



## **ADVICE, Allocation Dynamique des Voies de Circulation : Analyse système et choix technologique, livrable final de la Tache 2**

René Chalon, Bertrand David, Philippe Liatard, Hélène Tattegrain, Myriam Hugot, Fabien Moreau, Laurent Geray

### **► To cite this version:**

René Chalon, Bertrand David, Philippe Liatard, Hélène Tattegrain, Myriam Hugot, et al.. ADVICE, Allocation Dynamique des Voies de Circulation : Analyse système et choix technologique, livrable final de la Tache 2. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2014, 127 p. hal-01308363

**HAL Id: hal-01308363**

**<https://hal.science/hal-01308363>**

Submitted on 27 Apr 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**Programme 190 – 0190 – THUR –BASF**  
**Action 13 sous-action 04**  
**11-MT-PREDITG02-2-CVS-050**  
**Convention n° CHORUS 2100527197**

# **ADViCe : Allocation Dynamique des Voies de Circulation**

Dossier porté par l'  
**Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de  
l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) –**  
*Laboratoire Ingénierie Circulation Transport (LICIT), unité mixte avec l'Ecole Nationale  
des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)*  
*Laboratoire Ergonomie et Sciences Cognitives pour les Transports (LESCOT)*

En partenariat avec :  
**Volvo IT –**  
*Département Innovation*

**Commissariat à l'Energie Atomique –**  
*Leti*

**Ecole Centrale de Lyon –**  
*Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information (LIRIS)*

**EGIS France –**

*Coordinateur scientifique :*  
*Nicolas Chiabaut (IFSTTAR-ENTPE/LICIT), 04 72 04 77 58, [nicolas.chiabaut@entpe.fr](mailto:nicolas.chiabaut@entpe.fr)*



# ADVICE

# Analyse système & choix technologique

## *Livrable Final de la Tache 2.*

### Contributeurs :

René Chalon (ECL), Bertrand David (ECL), Liatard Philippe (CEA-LETI), Hélène Tattegrain (IFSTTAR), Myriam Hugot (IFSTTAR), Fabien Moreau (IFSTTAR), Laurent GERAY (Volvo IT)



## TABLE OF CONTENTS

<b>1</b>	<b>PROJET ADVICE (ALLOCATION DYNAMIQUE DES VOIES DE CIRCULATION)</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>TACHE 2</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>DONNEES ET FONCTIONS NECESSAIRES A LA GESTION DE TRAFIC</b>	<b>6</b>
3.1	LES DONNEES NECESSAIRES A LA GESTION DE TRAFIC	6
3.2	LES FONCTIONS NECESSAIRES A LA GESTION DE TRAFIC	6
<b>4</b>	<b>ARCHITECTURE DU SYSTEME ENVISAGE</b>	<b>8</b>
4.1	SOLUTION ENVISAGEE	8
4.2	MODELISATION	10
4.3	UNE ANALYSE DES INTERFACES HOMMES/MACHINES	16
4.4	LES DIFFERENTS ACTEURS DU SYSTEME	17
<b>5</b>	<b>TECHNOLOGIES ACTUELLEMENT UTILISEES POUR L'IDENTIFICATION DES VEHICULES ..</b>	<b>18</b>
5.1	RE-IDENTIFICATION AVEC EQUIPEMENT PREALABLE DES VEHICULES	18
5.2	RE-IDENTIFICATION POTENTIELLE DE TOUS LES VEHICULES	20
5.3	RE-IDENTIFIER AVEC DES CAPTEURS MAGNETIQUES	24
5.4	CONCLUSION IDENTIFICATION DES VEHICULES	36
<b>6</b>	<b>TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION VEHICULES VERS INFRASTRUCTURES ET LES COMMUNICATIONS ENTRE LES CAPTEURS</b>	<b>37</b>
6.1	APPROCHE	37
6.2	FONCTIONS ET ELEMENTS CRITIQUES	37
6.3	AUTRES PARAMETRES	38
6.4	LISTE DES SOLUTIONS RF	38
6.5	LISTE DES SOLUTIONS INTEGREES	52
6.6	IDENTIFICATION DES VEHICULES : TECHNOLOGIES RFID	60
6.7	ABREVIATIONS	90
<b>7</b>	<b>TECHNOLOGIES POUR LA SIGNALISATION</b>	<b>92</b>
7.1	LES LED	92
7.2	SYNTHESE LED	95
7.3	OLEDs	96
7.4	COMMUNICATION PAR LA LUMIERE OU VLC	100
7.5	LES LEDS EN RESEAU	102
7.6	CONCLUSION TECHNOLOGIES POUR LA SIGNALISATION	103
<b>8</b>	<b>LA SIGNALISATION</b>	<b>104</b>
8.1	PRISE EN COMPTE DE L'USAGER DANS LA CONCEPTION DU SYSTEME ADVICE	104
8.2	COMPREHENSION ET LISIBILITE DE LA SIGNALISATION	104
8.3	UTILISABILITE DU SYSTEME ADVICE ET DE SES CHANGEMENTS DE MODES	119
<b>9</b>	<b>CONCLUSION RAPPORT</b>	<b>121</b>
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>122</b>



## 1 PROJET ADVICE (ALLOCATION DYNAMIQUE DES VOIES DE CIRCULATION)

Lutter efficacement contre la congestion routière, améliorer durablement la sécurité des automobilistes sont deux des objectifs majeurs des gestionnaires d'infrastructures routières. En milieu urbain, la congestion du trafic a un impact direct sur la qualité des transports collectifs (TC) de surface.

Au-delà de leur extension, l'optimisation des infrastructures existantes et le déploiement de Systèmes de Transport Intelligent (STI), qui rendent possible la gestion dynamique du trafic, sont une solution.

Le projet ADViCe, issu d'un travail collaboratif d'un Think Tank du LUTB « Systèmes de transport », propose d'évaluer la pertinence de la mise en place d'une stratégie d'allocation dynamique des voies de circulation. L'objectif étant d'améliorer l'efficacité des transports prioritaires (bus, pompiers, etc.) sans limiter sensiblement l'espace disponible pour les autres véhicules.

Les objectifs du projet Advices sont :

- Définir une **méthodologie** pour la mise en place d'une solution **innovante** de gestion du trafic
- Développer les **technologies adaptées** et les mettre en œuvre
- **Expérimenter** les stratégies ADViCe
- **Evaluer et optimiser** les scénarios de régulation

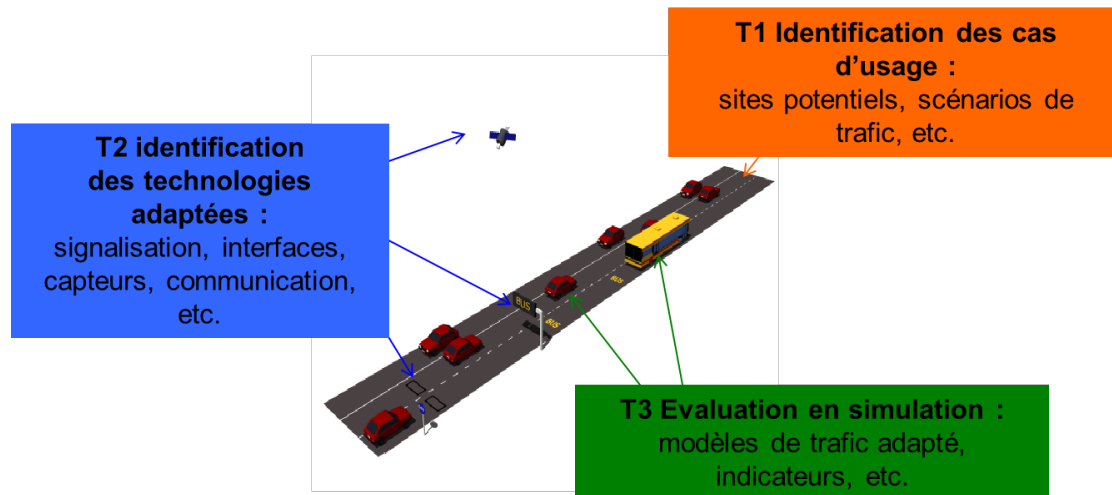
Le projet est découpé en 2 phases :

- Conception d'une solution innovante
  - Identification des cas d'usage (tache 1)
  - Analyse système, choix technologique (tache 2)
  - Evaluation théorique par la simulation (Tache 3)
  - Préconisation pour une future expérimentation (Tache 4)
- Implémentation & expérimentations
  - Développement, test des technologies
  - Expérimentation
  - Evaluation
  - Optimisation

## 2 TACHE 2

Ce livrable représente le livrable final de la tâche 2.

Dans ce rapport nous identifierons les fonctions nécessaires à la gestion du trafic et nous décrirons les technologies permettant de les réaliser.



Détail du livrable de la tâche 2 :

- Définition de l'architecture système
- Description de l'Interface homme/machine (IHM)
- Identification des technologies adaptées : Capteurs, LEDs, transmission de l'information
- Description du type de signalisation
- Enquête sur l'acceptation de la signalisation dans l'environnement

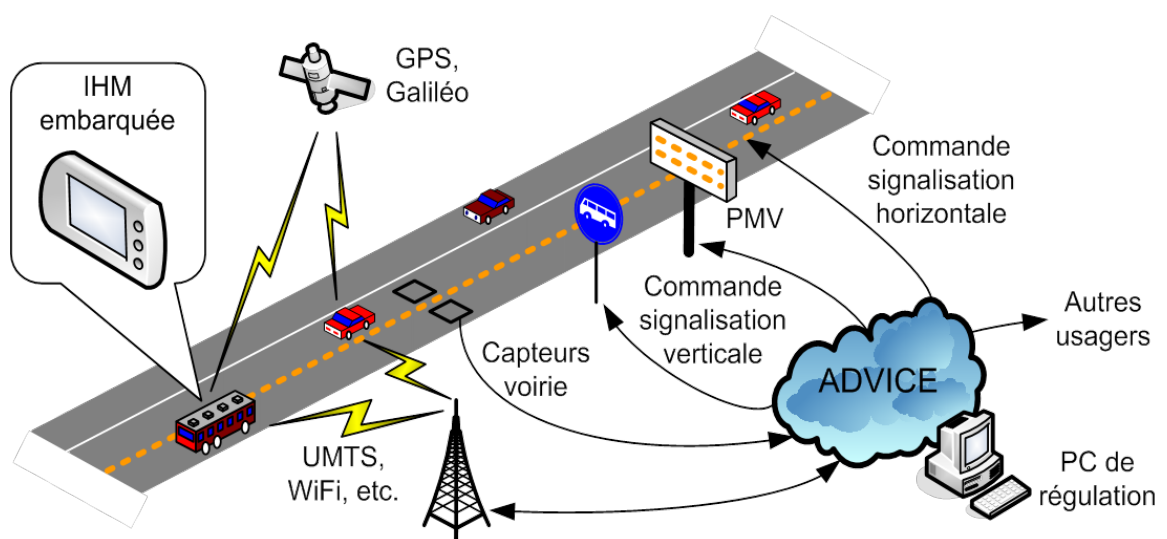


Figure 1 : Les éléments principaux du système Advice

### 3 DONNEES ET FONCTIONS NECESSAIRES A LA GESTION DE TRAFIC

#### 3.1 Les données nécessaires à la gestion de trafic

Aujourd'hui, les Systèmes de Transport Intelligents, et en particulier les méthodes de gestion dynamique du trafic, sont de plus en plus développés dans le but de fluidifier le trafic [EUR10].

Une gestion dynamique nécessite d'obtenir en temps réel différentes données sur l'état du trafic. A partir de ces données, on peut adapter les stratégies à mettre en place pour fluidifier le trafic, comme par exemple la réduction de la vitesse maximale de circulation, la régulation du nombre de véhicules entrant sur une voie rapide, ou dans notre cas l'allocation dynamique de voies. On peut également mettre à jour les modèles de trafic, ou encore informer le conducteur de l'imminence d'une congestion, lui permettant ainsi de changer d'itinéraire.

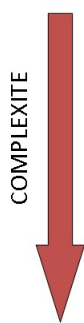
Les données de trafic classiques, comme la présence ou le passage d'un véhicule, le débit (nombre de véhicules sur une portion de chaussée donnée pendant un intervalle de temps donné), le taux d'occupation (pourcentage de temps pendant lequel une portion de chaussée est occupée par des véhicules), et la vitesse moyenne ou instantanée des véhicules, sont recueillies avec des précisions satisfaisantes depuis plus de 10 ans [CER99].

Une donnée un peu plus complexe à recueillir est la classe des véhicules circulant sur la chaussée (par exemple motorcycle, véhicule léger, ou poids lourd). Elle est principalement utile en temps différé [KLE06] pour anticiper l'usure des routes mais elle permet aussi de dissocier les débits, taux d'occupation et vitesses de chaque catégorie de véhicules, ce qui conduit à une modélisation plus réaliste et donc à une meilleure prévision du trafic.

Citons deux autres données importantes pour les gestionnaires de trafic : le temps de parcours et la matrice origine-destination. On appelle « temps de parcours » le temps nécessaire pour aller d'un point A à un point B. Connaître en temps réel les temps de parcours est utile pour informer les conducteurs, et pour mettre à jour des modèles de prédiction de temps de parcours, qui sont une des clés de la gestion de trafic [KHO11]. La Matrice Origine-Destination (MOD) est une autre donnée essentielle pour modéliser l'écoulement du trafic à une intersection [KHO11-2] : chaque élément  $a_{ij}$  de cette matrice représente le nombre de véhicules venant de la rue  $i$  et allant vers la rue  $j$  pour une période de temps fixée.

#### 3.2 Les fonctions nécessaires à la gestion de trafic

Par ordre de complexité croissante, les fonctions nécessaires à la gestion du trafic sont :

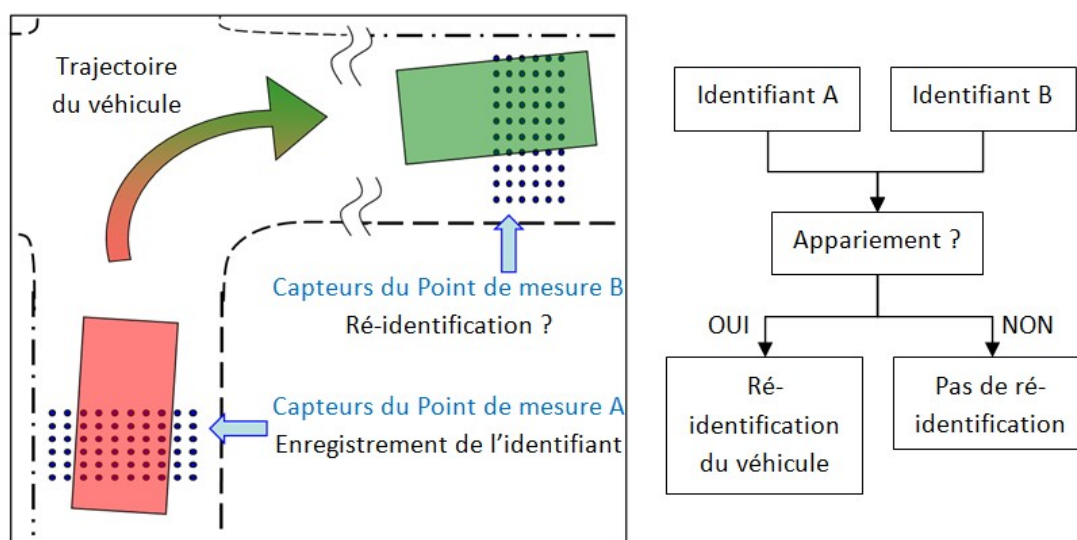
- 
- La **détection** de la présence des véhicules, de leur nombre et de leur vitesse qui permet de connaître l'état du trafic ;
  - La **classification** des véhicules par type : deux-roues, voitures et camions ou par niveau de priorité : auto-solistes, covoiturage, taxis, transports en commun, véhicules de secours ;
  - La **ré-identification** qui permet de reconnaître un véhicule précédemment détecté et ainsi de déterminer par exemple son temps de parcours ou sa matrice origine-destination.

Le temps de parcours des véhicules, prioritaires ou non, est une donnée clé pour juger de l'efficacité de l'allocation dynamique de voie de circulation, qui nécessite la ré-identification d'un même véhicule, tâche plus complexe que la classification. Il s'agit de détecter la présence d'un véhicule donné en différents points fixes situés sur une route.

La ré-identification est différente de l'identification, utilisée par exemple pour autoriser un véhicule à rentrer dans une zone à accès réglementé. En effet, lors de la ré-identification on compare les identifiants d'un véhicule obtenus en deux points de mesure successifs (l'identifiant

peut être par exemple la plaque d'immatriculation du véhicule), alors que pour l'identification, on compare l'identifiant mesuré à une base de données préétablie.

La ré-identification d'un véhicule fonctionne de la manière suivante : lors du 1<sup>er</sup> passage d'un véhicule vh1 en un point de mesure A à l'instant  $t_A$ , un signal est enregistré, et on en extrait un identifiant propre à ce véhicule. Lors du passage de ce même véhicule au point de mesure suivant B à l'instant  $t_B$ , on extrait de nouveau un identifiant : si l'on arrive à apparier les identifiants calculés en A et B, on dit alors qu'on a ré-identifié le véhicule vh1. On appelle « taux de ré-identification » le rapport entre le nombre de véhicules ré-identifiés et le nombre de véhicules ré-identifiables (Figure 2).



**Figure 2 : Principe de la ré-identification d'un véhicule**

Actuellement, le temps de parcours est surtout calculé de façon indirecte à partir de mesures globales du trafic, comme le débit, la densité, ou le taux d'occupation et la vitesse [CER08]. Pour être précises, ces méthodes nécessitent que les conditions de trafic soient stables dans l'espace et dans le temps, ce qui est concrètement rarement le cas. A l'inverse, ré-identifier un véhicule donne directement accès à un temps de parcours individuel entre les points de mesure A et B à partir des instants de passage  $t_A$  et  $t_B$ .

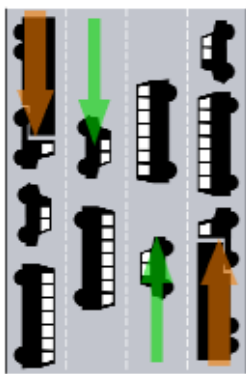
## 4 ARCHITECTURE DU SYSTEME ENVISAGE

### 4.1 Solution envisagée

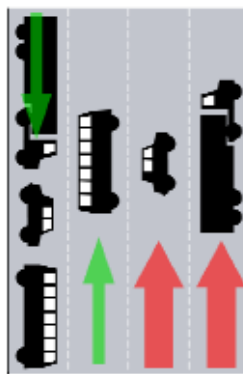
#### 4.1.1 Système dynamique de voirie :

- Allocation des voies par une centrale de gestion
- Informations aux usagers passifs par des interfaces sur la voirie directement
- Interface mobile pour les véhicules prioritaires, embarquée dans l'habitacle
- Communication avec la centrale pour demander une priorité.

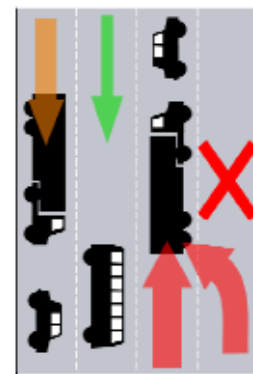
#### 4.1.2 Trois exemple de scenarii



*Usage normal  
de la voirie*



*Trafic  
surchargé dans  
une direction*



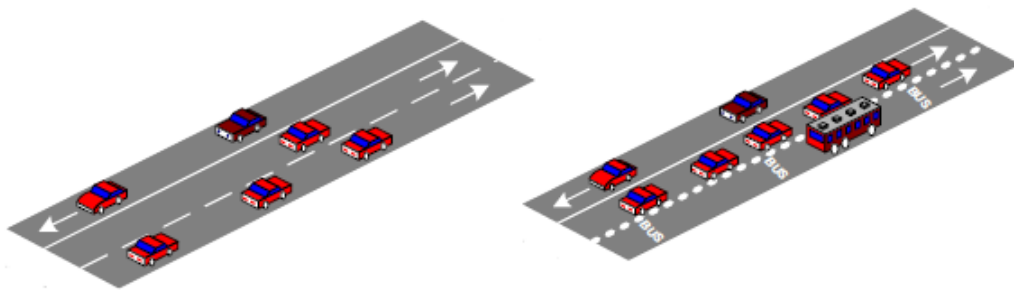
*Un accident  
bloque une voie*

#### 4.1.3 Analyse système

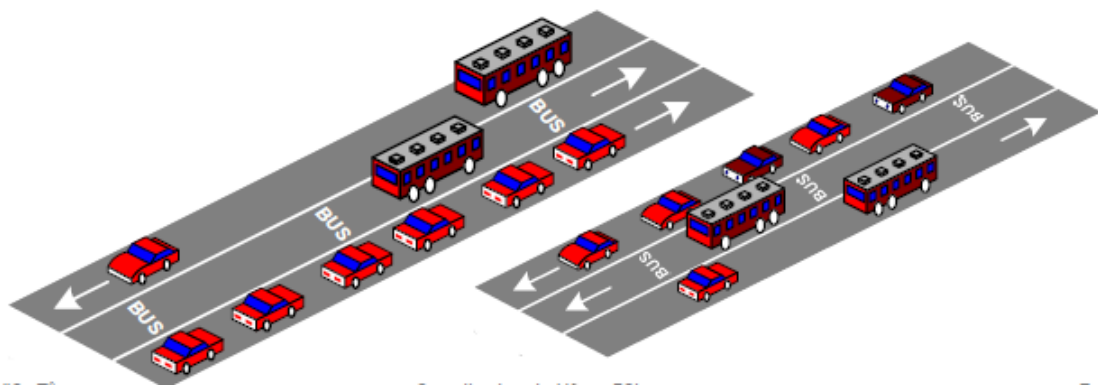
La mise en place d'un système de gestion dynamique des voies doit prendre en considération :

- Un ensemble de capteurs et d'actionneurs placés sur la voirie
- Les usagers concernés actifs et donc demandeurs (conducteurs TC, pompiers, police)
- Les usagers concernés passifs prioritaires : non demandeurs mais pouvant utiliser la voie de bus (ambulances, taxi, voire camions)
- L'information des usagers passifs non prioritaires (usagers lambda, « subissant » le système ADViCe)
- La diffusion d'informations externes vers les services d'information routières.
- Ces éléments et les technologies permettant leurs mises en oeuvre sont à identifier. Ils doivent ensuite être intégrés au sein d'un système global, collectant, agrégeant, traitant et diffusant les informations appropriées à tous les usagers. C'est ce système qui pourra d'abord être simulé, avec des simplifications appropriées et à choisir. L'intégration du système ADViCe à des systèmes de régulation de trafic classiques sera également étudiée.

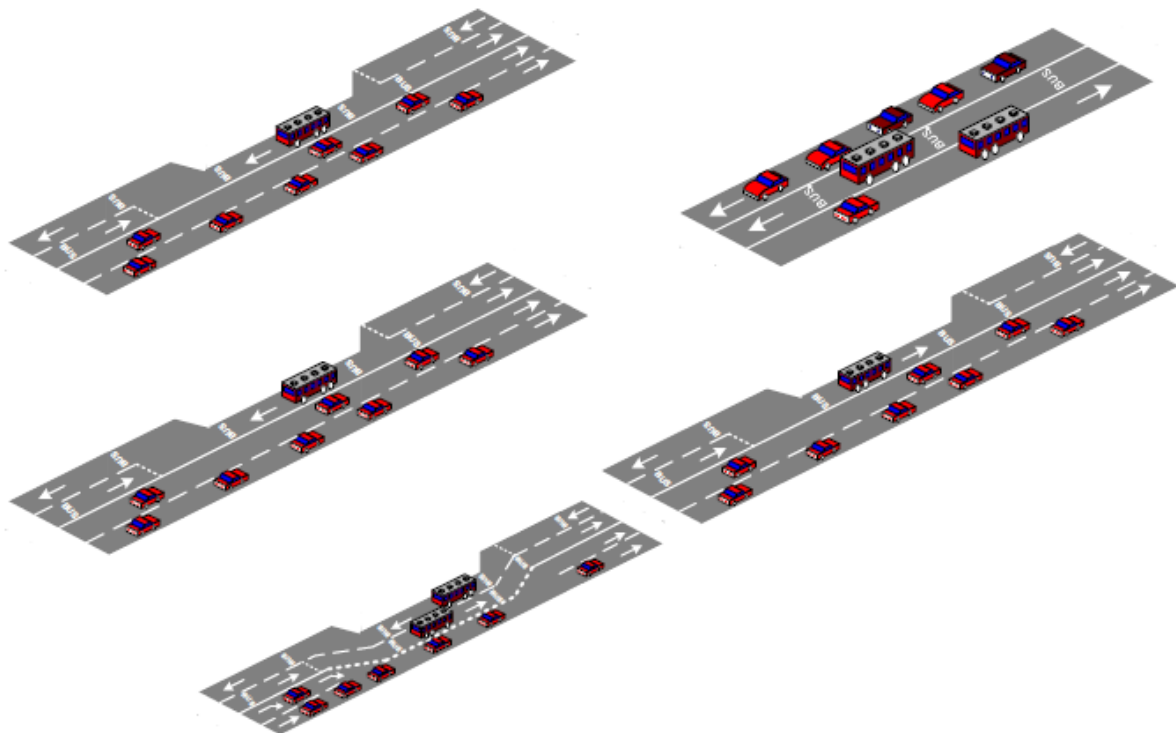
**Figure 1.** *Cas 1 - Transformation de la voie de droite en voie réservée aux bus*



**Figure 2.** *Cas 2 - Changement de sens d'une voie réservée aux bus*



**Figure 3.** *Cas complexe - Voirie avec voie bus réservée à double sens présentant une section à voie unique (rétrécissement de chaussée)*



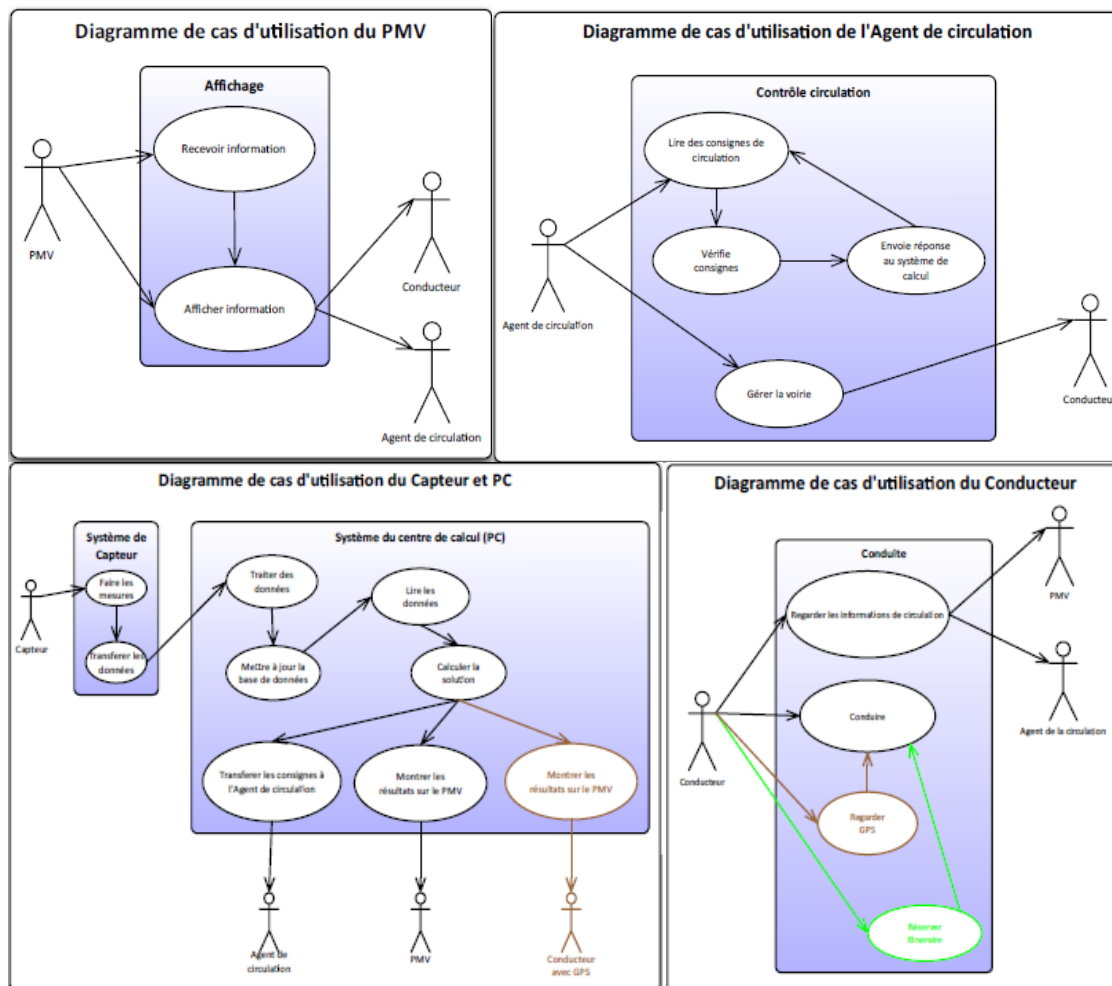
#### 4.1.4 Eléments l'architecture système

- Les capteurs dans la voie concernée par la collecte d'informations sur l'état du trafic et des demandes de priorité ;
- Les véhicules des usagers actifs qui sont demandeurs des priorités et qui reçoivent des informations sur l'état des voies et autres pour affichage « on-board » ;
- Les véhicules des usagers passifs prioritaires ou non qui ne peuvent pas agir, mais reçoivent des informations sur l'état des voies et autres directives ;
- Le PC de régulation, organe vital de coordination, mais n'intervenant pas systématiquement dans la gestion (le fonctionnement automatique est privilégié) ;
- La signalisation tant verticale (panneau à message variable, panneaux lumineux, signalisations) qu'horizontale donnant l'information sur l'état et l'évolution des affectations des voies ;
- Le système ADVice proprement dit de gestion des priorités avec des composants principaux suivants : (i) collecte d'information, (ii) gestion des priorités ; (iii) gestion des voies et (iv) diffusion d'information ;
- L'élément caché, mais primordial, le système de transmission d'information (le réseau d'information).

#### 4.2 Modélisation

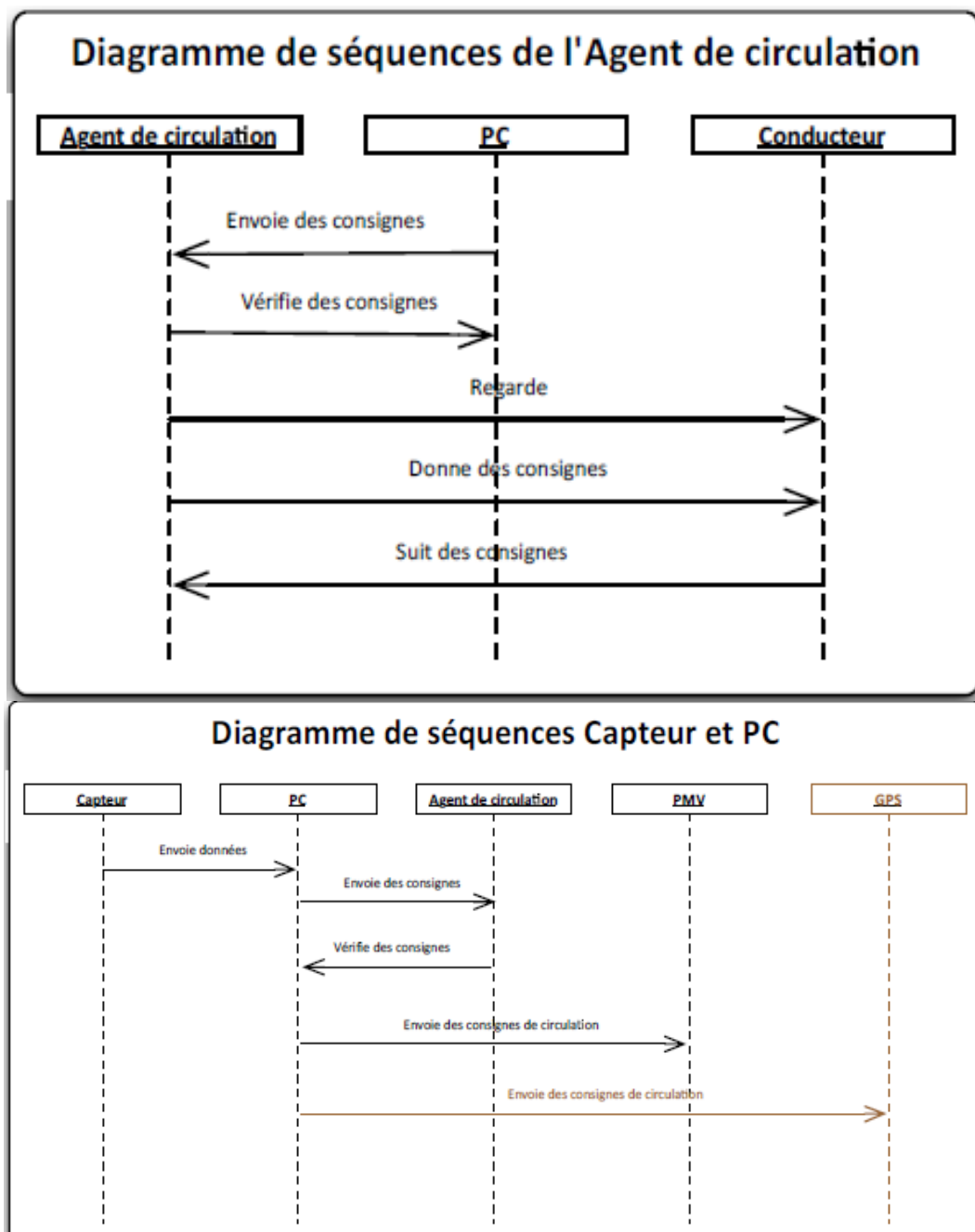
- Aspect statique – Diagrammes de cas d'utilisation
- Aspect dynamique – Diagrammes de séquences
- Paquetage de classes et Diagramme de classes (Aspect statique)

##### 4.2.1 Diagramme de cas d'utilisation



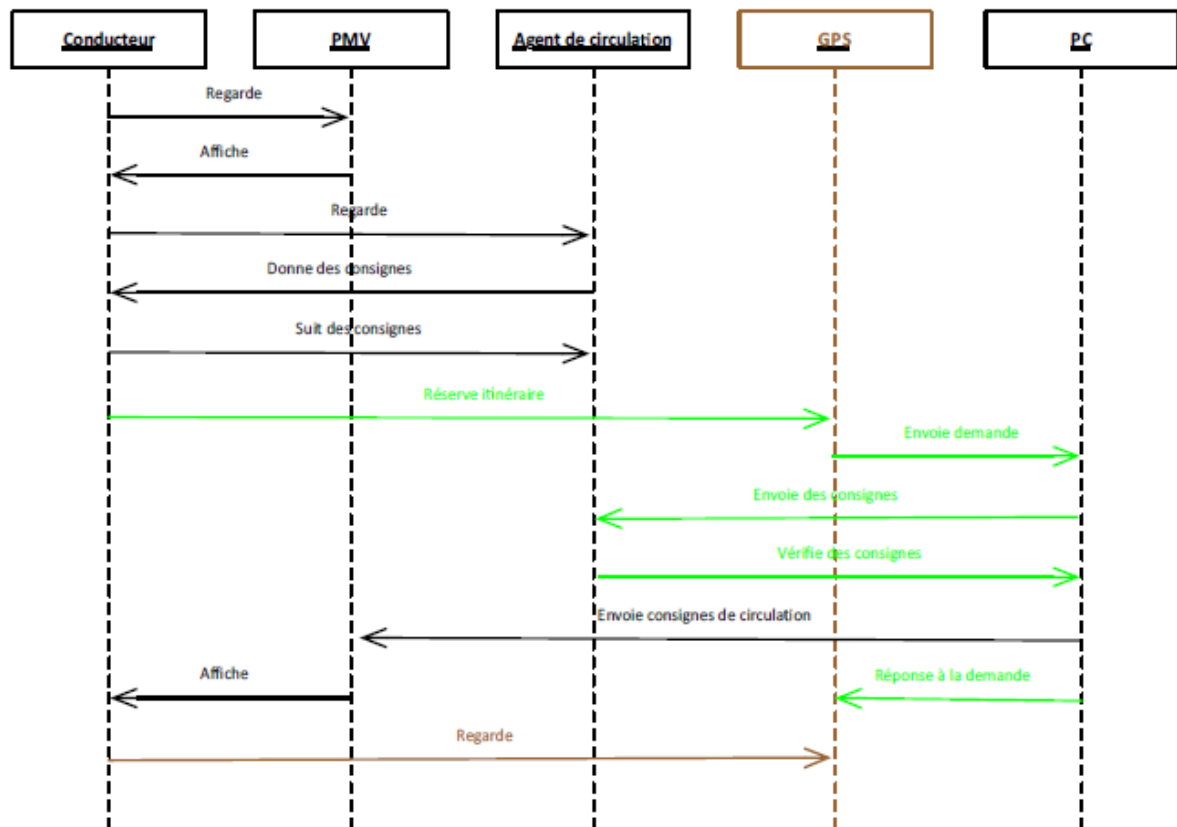


#### 4.2.2 Diagramme de sequences

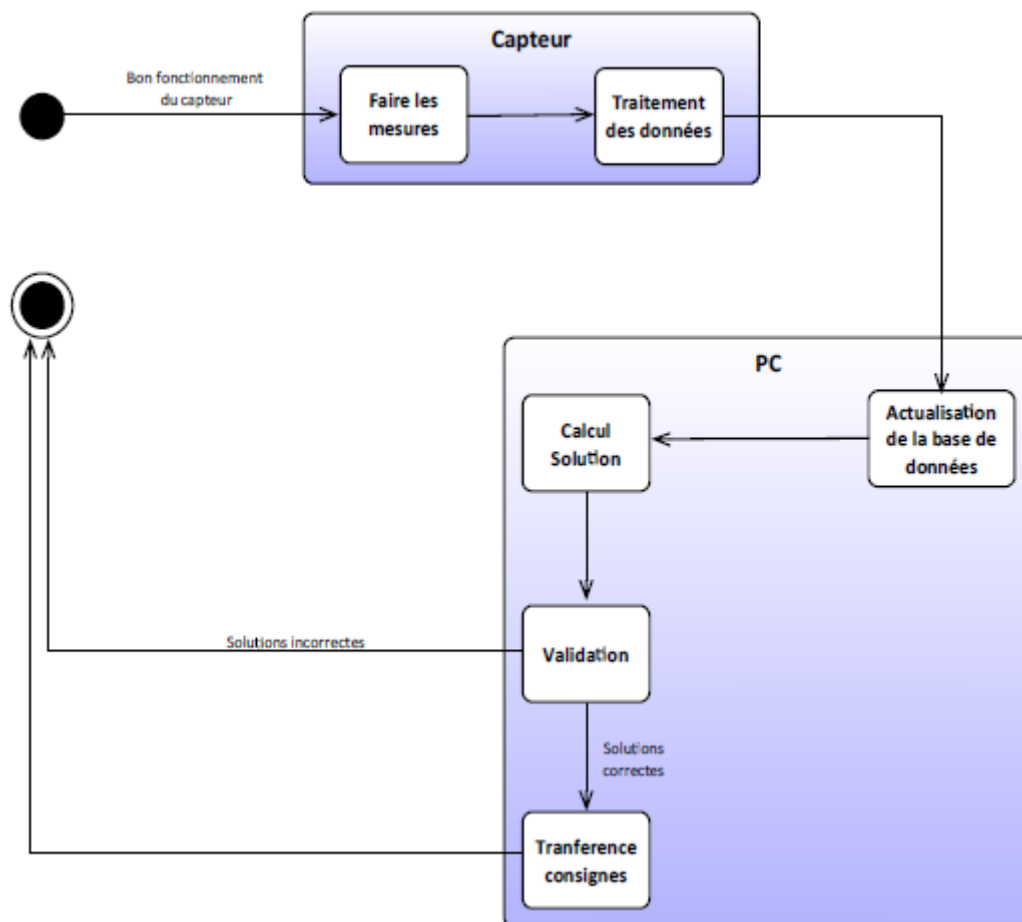




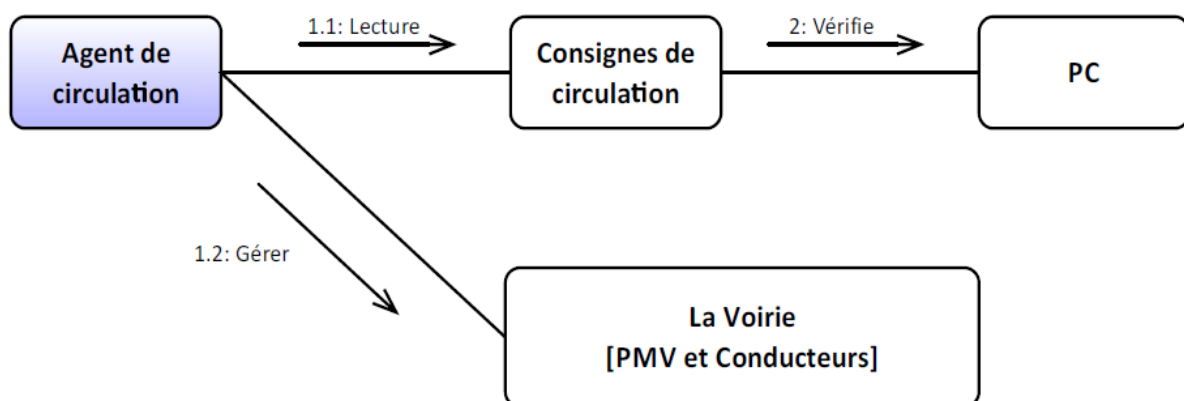
## Diagramme de séquences du Conducteur et PMV



#### 4.2.3 Diagramme d'états

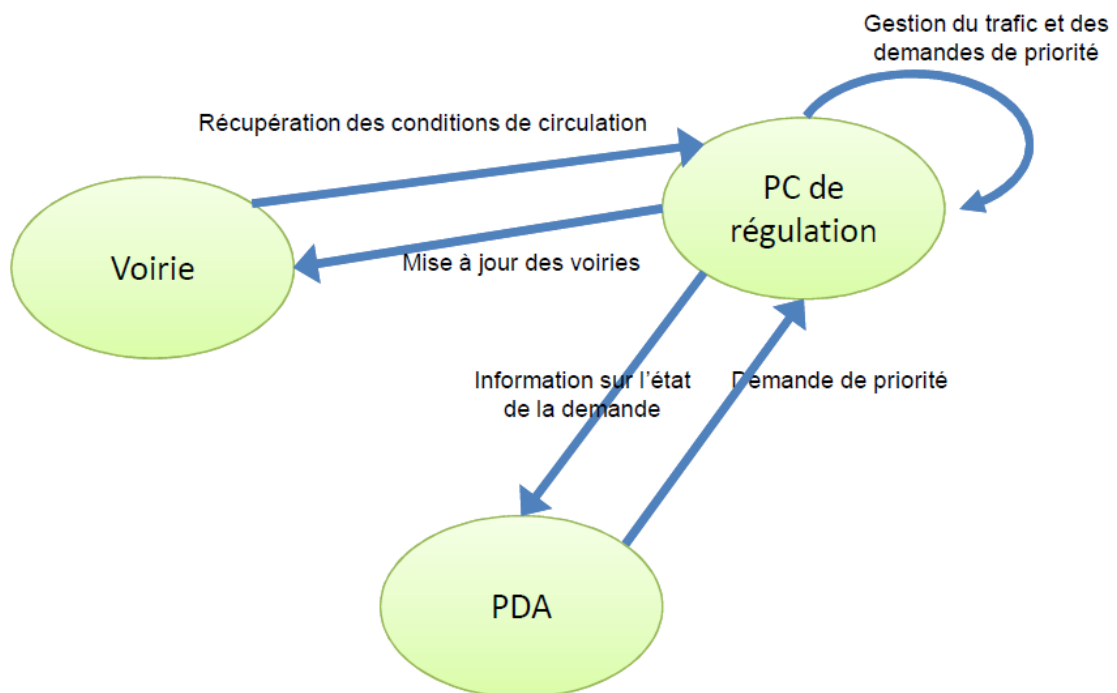


#### 4.2.4 Diagramme de collaboration

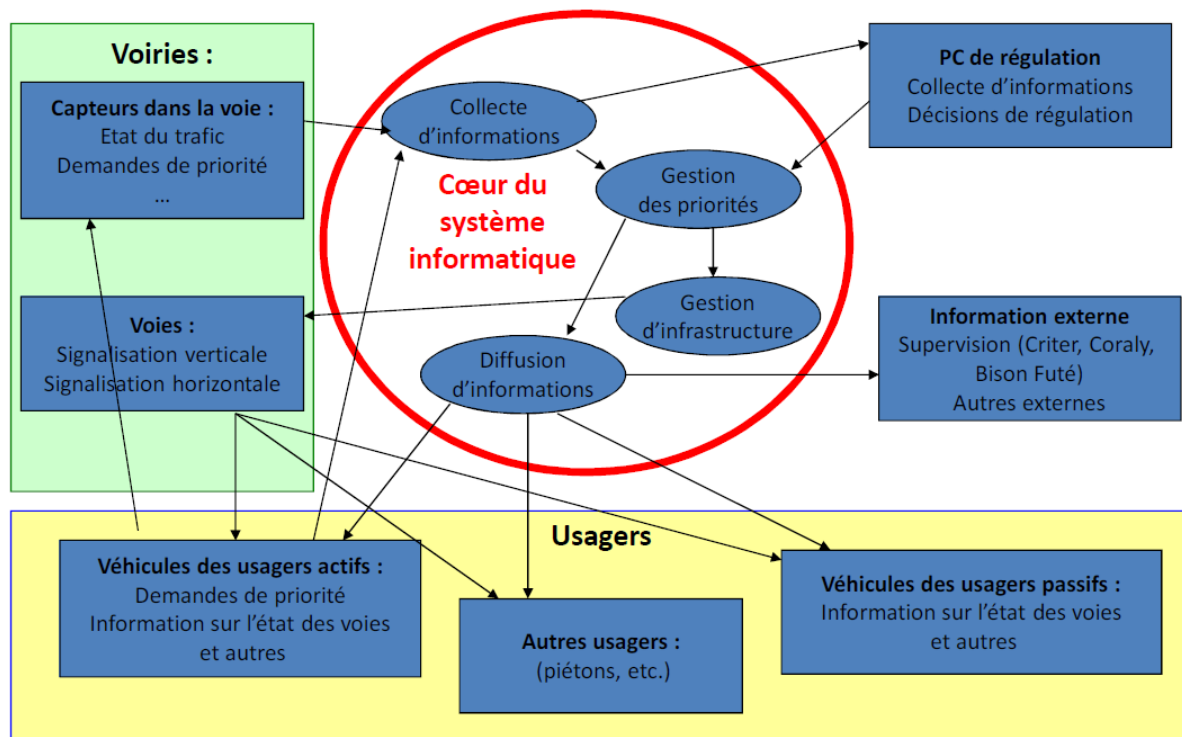


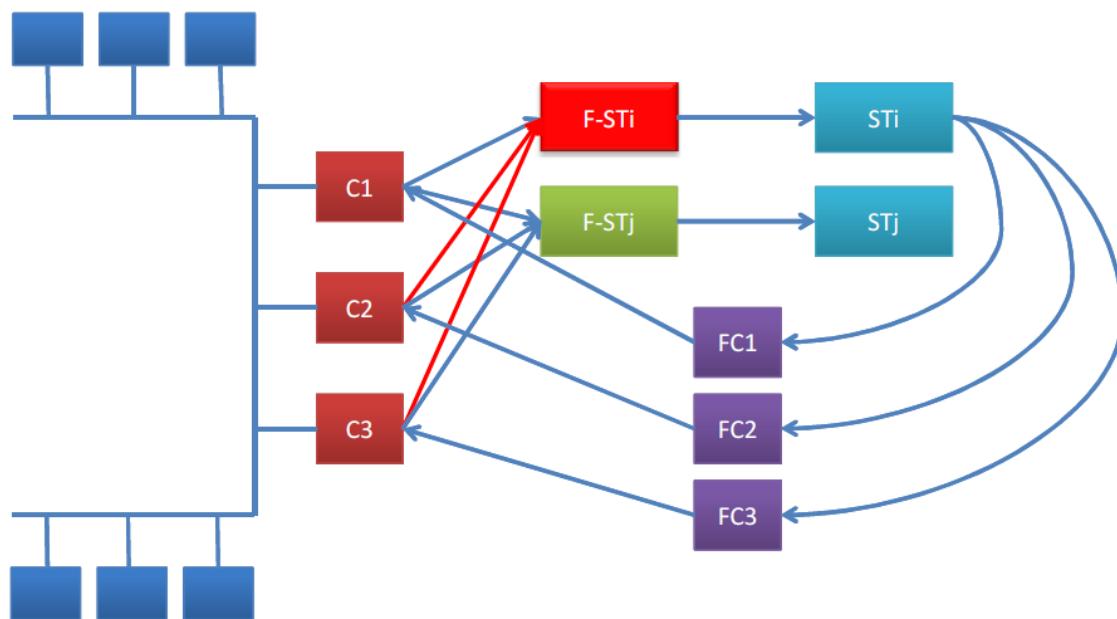


#### 4.2.6 Système global



*Vision système du support de gestion dynamique des voiries*





### 4.3 Une analyse des interfaces hommes/machines

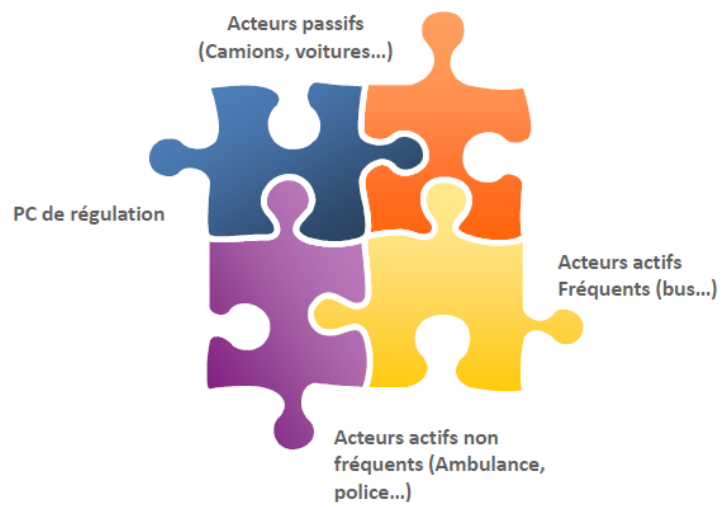
Par rapports aux acteurs identifiés dans la vision système, il est important de se préoccuper le plus tôt possible de l'aspect utilisateur qui se traduit notamment par la mise en place des interfaces Homme/Machine appropriées : les usagers actifs (demandeurs), les usagers passifs prioritaires

(bénéficiaires du système), ), les usagers passifs non prioritaires (subissant le système et équipés d'un terminal dans leur véhicule), les décideurs (PC de régulation) et tous les usagers (véhicules à moteur, cyclistes, piétons) subissant le système et non équipés d'un terminal dans leur véhicule utilisant uniquement les signalisations verticales et horizontales pour leur permettre de recevoir et éventuellement d'agir de façon appropriée.

Les interfaces étudiées seront de deux types :

- Dans le véhicule. Dans ce cas, Les contraintes de la double tâche – conduire et gérer le système sur un poste de travail seront particulièrement prise en compte en utilisant les connaissances des partenaires sur l'activité de conduite et leurs expériences en terme de conception de système d'assistance à la conduite.
- A l'extérieur avec des contraintes météorologique de visibilité, de lisibilité et de compréhension des informations verticales et horizontales mises en place. Cette partie sera réalisée en étroite collaboration avec la tâche suivante réalisée par le CETE.

#### 4.4 Les différents acteurs du système



## 5 TECHNOLOGIES ACTUELLEMENT UTILISEES POUR L'IDENTIFICATION DES VEHICULES

Plusieurs technologies permettent de détecter, classifier, voire ré-identifier des véhicules. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux technologies autres que les capteurs magnétiques, qui seront traités au chapitre 5.3.

On distinguera les méthodes qui nécessitent d'équiper les véhicules qui seront ré-identifiés et celles qui ré-identifient potentiellement tous les véhicules.

### 5.1 Ré-identification avec équipement préalable des véhicules

Avec ces technologies (Figure 3), seuls les véhicules équipés sont ré-identifiables : ils sont alors appelés « véhicules sondes ».



**Figure 3 : Technologies nécessitant un équipement préalable des véhicules : téléphone portable équipé d'un GPS (à gauche), et principe de péage avec badge équipé d'une puce RFID (à droite)**

#### 5.1.1 Ré-identification par suivi de la position du véhicule

Plusieurs moyens permettent de suivre la position des véhicules à l'aide de systèmes embarqués : les téléphones portables, les téléphones portables équipés d'une puce GPS, et les GPS directement intégrés aux véhicules. Les frais d'équipement sont laissés à la charge du conducteur, ce qui en fait une solution peu chère pour les gestionnaires de trafic mais nécessite d'impliquer et de convaincre le conducteur de l'intérêt du système.

Les téléphones portables sans GPS peuvent être localisés à l'aide du réseau de téléphonie mobile (par triangulation à partir des antennes réseaux par exemple), mais la précision du positionnement est généralement de 300 m [LED08, MOH11], ce qui est trop faible pour ré-identifier un véhicule, car cela nécessite de savoir qu'il se trouve en un point précis à un moment donné. Avec une précision de 300 m, la présence du véhicule pourrait être détectée sur une route autre que celle sur laquelle il roule, faussant ainsi le calcul de temps de parcours.

La précision du positionnement GPS est de l'ordre de quelques mètres [MER10], mais elle est toutefois très sensible à l'environnement artificiel comme naturel : [SCH12] indique par exemple les problèmes rencontrés en environnement urbain (présence de tunnels, d'immeubles, de métal, d'autres véhicules, de murs anti-bruit et de sources radio).

Pour compenser cette sensibilité et être capables de localiser un véhicule sur une voie donnée, [SCH12] fusionne les données GPS avec celles de capteurs supplémentaires embarqués dans

les véhicules (gyroscopes, accéléromètres, altimètres, ...). Le GPS ne semble donc pas pouvoir être utilisé seul dans certains environnements.

L'utilisation des GPS directement intégrés aux véhicules pour faire de la gestion de trafic est freinée par le nombre encore faible de véhicules qui en sont équipés. De plus, ce pourcentage de véhicules équipés ne devrait pas augmenter car aujourd'hui les ventes de GPS stagnent au profit des ventes de téléphones portables munis de GPS.

L'utilisation des téléphones portables avec GPS est quant à elle de plus en plus expérimentée en gestion de trafic [HER09], et les partenariats entre opérateurs téléphoniques et diffuseurs d'information trafic se multiplient.

Malgré un problème d'anonymat des données qu'il faut absolument garantir pour rassurer les utilisateurs [LED08, BEL08] et une précision de localisation qui dépend de l'environnement, cette façon de recueillir des informations sur le trafic en temps réel paraît prometteuse. Notons cependant que bien qu'il y ait actuellement 72 millions d'abonnements mobiles en France, soit plus d'un abonnement par habitant (Source ARCEP septembre 2012), on ne peut garantir que tous les véhicules soient équipés d'un téléphone portable, et encore moins d'un téléphone portable avec GPS. L'estimation de temps de parcours ou de matrices origine-destination est donc délicate avec ce mode de recueil de données.

### **5.1.2 Ré-identification par identification du véhicule en des points fixes**

Il est aussi possible de ré-identifier les véhicules équipés d'un badge avec puce RFID (radio-identification), utilisé par exemple pour s'acquitter des frais d'autoroute (système Télépéage en France) : le véhicule sera alors ré-identifié à chaque point fixe muni d'un lecteur de badge [KAT08, YUM11].

D'après [YUM11], moins de 0.001% des véhicules ne sont pas détectés par le système, ce qui nous donne un taux de ré-identification de pratiquement 100% des véhicules équipés.

En France, il y avait 4,3 millions d'abonnés au télépéage fin 2011 (Source : ASFA, Association des Sociétés Françaises d'Autoroute) pour 38 millions de véhicules en circulation, ce qui signifie qu'un peu moins de 9% des véhicules français étaient alors équipés.

Là aussi, les frais d'équipement en badge sont laissés à la charge du conducteur, mais le gestionnaire de la route doit de son côté installer des lecteurs de badge couvrant toutes les voies de circulation (donc montés sur des portiques surplombant les voies) et capables de fonctionner avec des badges en mouvement (jusqu'à 130 km/h sur les autoroutes françaises).

Or, d'après [RIT10], un lecteur de badges de péage coûte 2 000 à 4 000 \$ (1 550 à 3 100 €) de frais d'installation par voie, dure 10 ans, et ses frais de maintenance annuels sont évalués à 10% de son coût d'installation (évaluation de 2001). De plus, l'utilisation de badges RFID pose le même problème d'anonymat des données que les téléphones portables.

De façon similaire, les adresses MAC d'équipements Bluetooth présents dans un véhicule (téléphones portables, GPS, casque audio, ...) peuvent être utilisées pour le ré-identifier, mais de façon anonyme, en des points fixes à l'aide de capteurs placés au bord de la route [ARA12, RES11]. Les temps de parcours estimés sont alors comparables à ceux obtenus avec des badges RFID [ARA12].

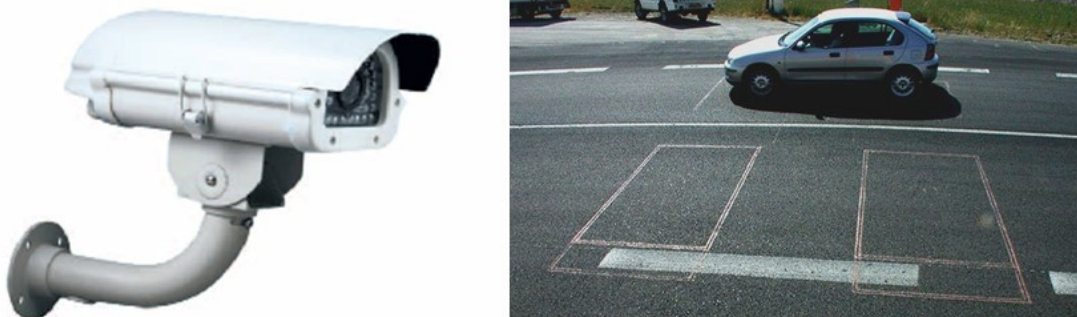
Toutefois, un système de comptage de véhicules peut être trompé par la présence de plusieurs appareils Bluetooth dans un même véhicule – cas qui ne devrait a priori pas apparaître avec les badges RFID.

De plus, les capteurs Bluetooth ont une faible fréquence d'échantillonnage, et [RES11] montre que le taux de détection dépend de la vitesse de passage des véhicules : à 30 mph (48 km/h), 93% des appareils Bluetooth sont détectés, mais à 45 mph (72 km/h), ce taux baisse à 87%. Enfin, d'après [RES11], seuls 5% des véhicules en circulation sont équipés.



## 5.2 Ré-identification potentielle de tous les véhicules

D'autres technologies permettent de ré-identifier tous les véhicules en des points fixes, sans être obligés de les équiper au préalable (Figure 4), évitant ainsi un échantillonnage biaisé des véhicules (les véhicules équipés pourraient être non représentatifs de l'ensemble des véhicules).



**Figure 4 : Technologies ré-identifiant potentiellement tous les véhicules : caméra à lecture de plaques d'immatriculation (à gauche), et boucles inductives (à droite)**

### 5.2.1 Capteurs non-intrusifs (hors chaussée)

Les caméras vidéo constituent une autre forme de collecte d'informations sur l'état du trafic. Installées sur des poteaux ou sur des structures adjacentes aux rues, elles ne nécessitent pas d'installation de composants dans la chaussée. Par opposition aux boucles électromagnétiques, ces systèmes sont dits « non intrusifs » et leur maintenance s'en trouve simplifiée.

Les données vidéo, noir et blanc ou couleur, sont transmises à des processeurs qui analysent les changements de caractéristiques de l'image vidéo lorsqu'un véhicule passe grâce à des algorithmes de détection du mouvement.

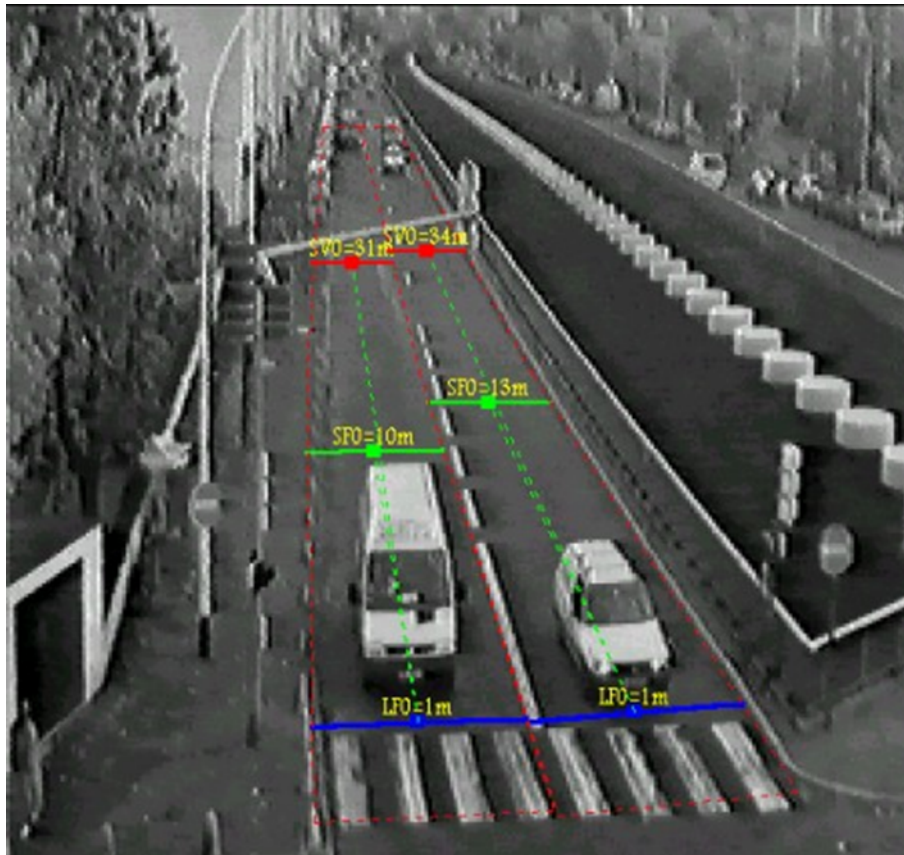
Il s'agit d'extraire les contours des objets, les reconnaître et les classer par un processus de reconnaissance des formes. Les caméras étant toujours fixes, la configuration initiale du système permet « d'apprendre » au processeur l'image de fond de référence.

Suivant la complexité des algorithmes mis en œuvre, on obtient pour chaque voie de circulation : la vitesse et le taux d'occupation de la voie, les intervalles entre véhicules et la progression du trafic. Selon les constructeurs, il est également possible de distinguer les véhicules en quatre classes et d'intégrer des fonctions d'alerte sur détection d'un véhicule arrêté ou circulant à contre-sens.

Des systèmes spécialisés, les Caméras à Lecture Automatique de Plaque d'Immatriculation (CLAP ou caméras à LAPL (Figure 5)), ajoutent une fonction de reconnaissance optique de caractère. Ils permettent d'accéder aux temps de parcours, à la matrice origine-destination, ainsi qu'à la vitesse moyenne sur un tronçon de route. Mais également à d'autres fonctions telles que l'identification des voitures volées ou la vérification des temps de pause des poids lourds.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour pouvoir reconnaître la plaque : il faut d'abord la détecter dans l'image filmée, puis séparer les caractères qui composent le numéro de la plaque, avant de pouvoir les reconnaître [HSU11]. Chacune de ces étapes est susceptible de conduire à un taux de ré-identification plus faible, qui atteint toutefois de 74% à 99% [ANA06].

Ce taux est légèrement sensible aux conditions météorologiques, d'après [CER08], il baisse de 5% par temps de pluie et la nuit, aux illuminations fortes (soleil rasant), aux masquages (végétation) et aux flous de bougé liés aux mouvements du support. On notera de plus que les véhicules aux plaques étrangères ne seront pas forcément ré-identifiables.



**Figure 5 : Caméra vidéo – Traitement de l'image (source MEDDE)**

Outre un nouveau problème d'anonymat des données, les CLAP sont surtout très chères : d'après [CHE07] et [RIT10], chaque caméra coûte entre 3 500 et 5 500 \$ (2 700 – 4 200 €), prix auquel s'ajoutent les frais d'installation de 1000 \$ (770 €) et des frais de maintenance estimés entre 200 et 1000 \$ (150 – 770 €) par an.

D'autres phénomènes physiques, tels que la rupture d'un rayon lumineux, le son ou l'écho d'une onde sonore, la chaleur ou la lumière émise, le poids ou la pression exercée sur la chaussée permettent de détecter, la présence, le passage et la vitesse d'un véhicule.

Les capteurs associés, plus ou moins performants ou contraignants, sont la cellule photoélectrique, le laser, le sonar, le radar à effet Doppler, le microphone, le tuyau en caoutchouc creux.



Radar Doppler



Capteur Laser



Capteur Ultrason

### 5.2.2 Capteurs intrusifs (dans la chaussée)

Une dernière technologie permet de ré-identifier des véhicules : les boucles inductives (ou boucles électromagnétiques) [CER07]. Ces capteurs sont les plus couramment utilisés depuis plus de trente ans sur les routes françaises et européennes pour mesurer des données de trafic

(débit, taux d'occupation, vitesse, ...), notamment par les stations de recueil de données de trafic du réseau national SIREDO<sup>1</sup> sur route ou sur autoroute.

Elles constituent la partie inductive d'un circuit résonnant. Lors du passage d'un véhicule à la verticale de la boucle, ses parties métalliques en mouvement modifient le courant induit de la boucle, faisant varier la fréquence de l'oscillation.

Les stations à une boucle, fonctionnant en « tout ou rien », comptabilisent le nombre de véhicules qui passent au-dessus de celle-ci pendant un intervalle de temps donné. A l'aide de deux boucles, il est possible d'estimer la vitesse et la longueur des véhicules ainsi que la distance qui les séparent.

Réalisant parfaitement la fonction « détection », notons que certaines boucles ont une géométrie et une sensibilité telle qu'une analyse de forme du signal produit permet, par comparaison avec une bibliothèque, d'identifier le type de véhicule et donc de réaliser la fonction « classification ».

Les taux de ré-identification obtenus avec les boucles inductives varient de 30 à 68% [ERN10, NDO09, COI07, CER07]. Cette ré-identification est anonyme et se base sur la longueur des véhicules, ou sur leur signature électromagnétique, c'est-à-dire la perturbation électromagnétique qui est mesurée par la boucle lorsque le véhicule passe au-dessus d'elle : ce signal est en théorie propre au véhicule, car il dépend des propriétés ferromagnétiques de son châssis [CER07]. La signature électromagnétique sert d'identifiant au véhicule d'un point de mesure à l'autre.

Toutefois, l'installation des boucles inductives reste chère (même si elle est plus abordable que celle des CLAP) : de 500 à 800 \$ (380 – 610 €) par boucle [VDC07]. En effet, elle nécessite de faire plusieurs saignées dans la chaussée (rectangle d'environ deux mètres sur un mètre cinquante sur une profondeur d'environ sept centimètres) et de bloquer la circulation pendant plus d'une heure par voie (Figure 6).

De plus, les boucles peuvent être abîmées par le passage de véhicules lourds, et doivent être renouvelées à chaque réfection de la chaussée (sans possibilité de les récupérer), ce qui entraîne des coûts de maintenance de 300 à 500 \$ par an (230 – 380 €) d'après [RIT10].



**Figure 6 : Les boucles électromagnétiques dans la chaussée (source MEDDE)**

---

<sup>1</sup> Système Informatisé de Recueil de Données.

### 5.2.3 Conclusion

La majorité des méthodes actuelles de ré-identification pose des problèmes d'anonymat des données, nécessite d'équiper le véhicule au préalable, et/ou coûte cher à l'unité ou en génie civil lors de l'installation.

Le Tableau 1 résume les principaux avantages et inconvénients des technologies autres que les capteurs magnétiques permettant de ré-identifier les véhicules. Nous allons voir par la suite que l'utilisation de capteurs magnétiques peut offrir une alternative économique respectant l'anonymat des conducteurs et fonctionnant sur tous les véhicules.

		Taux de ré-identification				
	Technologie	Données anonymes	%	Précision localisation	Coût installation	Frais annuels maintenance
Suivi du véhicule	Téléphone portable	Non	100% des véhicules équipés (très grand nombre)	~300 m	/	/
	Téléphone portable + GPS	Non	100% des véhicules équipés (nombre croissant)	quelques m	/	/
	GPS	Non	100% des véhicules équipés (peu nombreux)	quelques m	/	/
Ré-identification en points fixes	Badge RFID	Non	~100% des véhicules équipés (9% en France)	< 1 m	1 550 – 3 100 €	155 – 310 €
	Bluetooth	Oui	< 100% des véhicules équipés (5%, nombre croissant), dépend de la vitesse		?	?
	Caméras CLAP	Non	74 – 99%		3 470 – 4 970 €	150 – 770 €
	Boucles inductives	Oui	30 – 68%		380 – 610 €	230 – 380 €

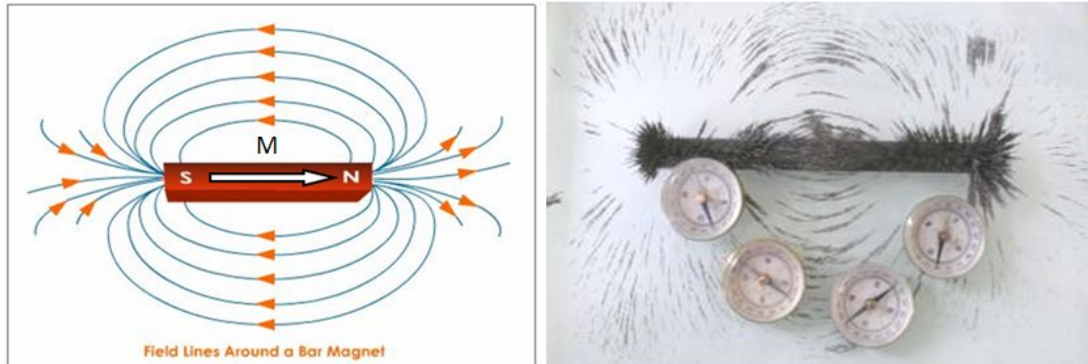
**Tableau 1 : Principales caractéristiques des technologies permettant de ré-identifier des véhicules**



## 5.3 Ré-identifier avec des capteurs magnétiques

### 5.3.1 Le ferromagnétisme

L'aimant est l'objet le plus connu générant par lui-même un champ magnétique à cause de son aimantation. Ce champ peut être mis en évidence en plaçant une boussole ou de la limaille de fer au voisinage de l'aimant (Figure 7).

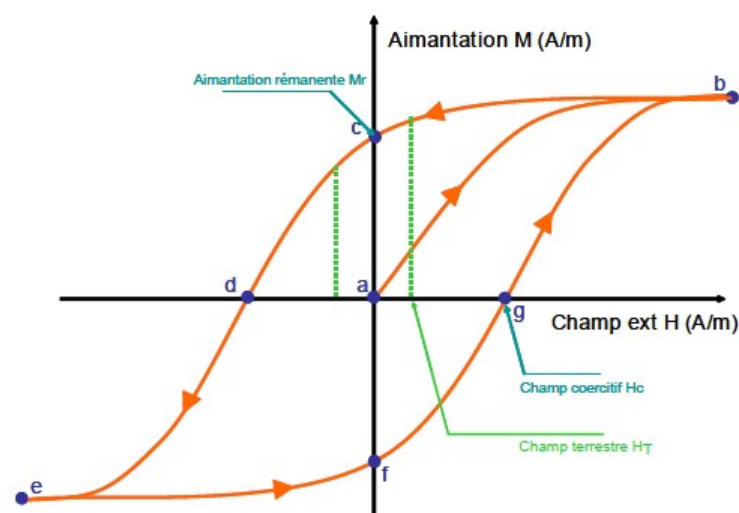


**Figure 7 : Champ magnétique généré par un aimant**

L'aimant est constitué d'un matériau dit « ferromagnétique dur », qui garde une aimantation orientée dans une direction particulière, même lorsque l'aimant n'est pas excité par un champ d'excitation magnétique externe.

En magnétisme, on distingue trois types de matériaux en fonction de leur réaction à un champ d'excitation externe : les matériaux diamagnétiques, qui s'aimantent faiblement dans un sens opposé à l'excitation, les matériaux paramagnétiques, qui s'aimantent faiblement dans le même sens que l'excitation, et les matériaux ferromagnétiques, qui s'aimantent fortement dans le même sens que l'excitation. Ce sont ces derniers matériaux qui nous intéressent particulièrement pour l'étude des signatures magnétiques de véhicules.

La relation entre l'aimantation et le champ extérieur présente un cycle d'hystérésis (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ce qui confère une « mémoire » au matériau : son aimantation peut ne pas être nulle, même en l'absence d'excitation magnétique extérieure.



**Figure 8 : Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique**

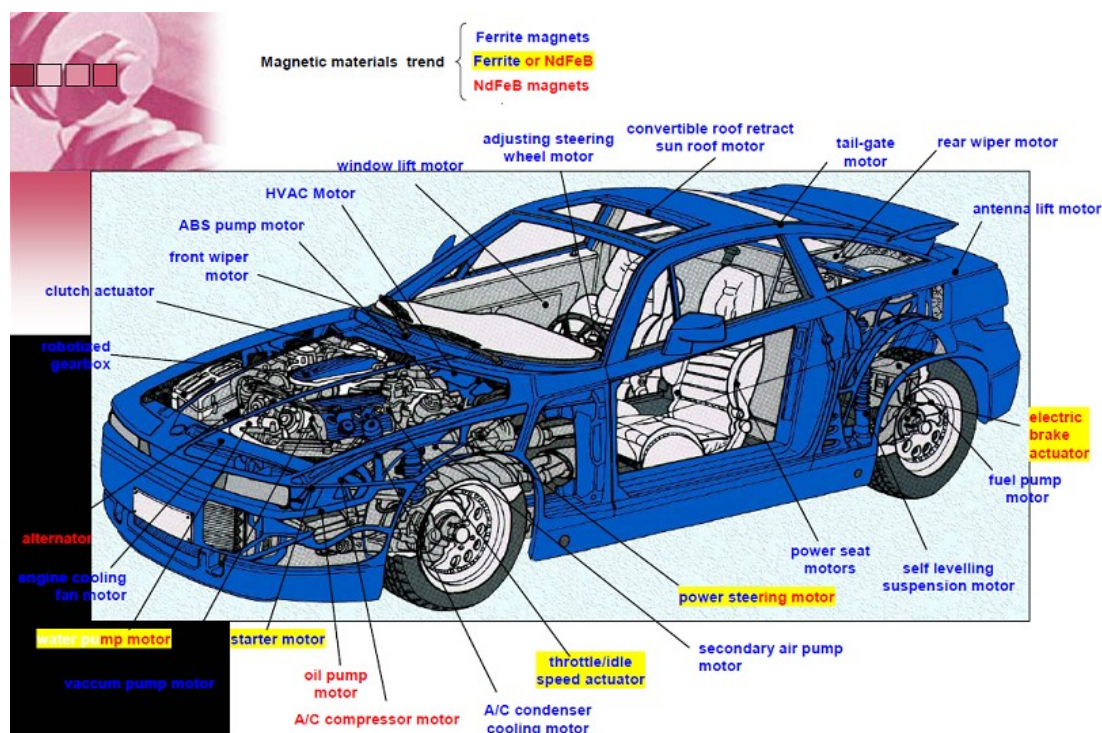
En effet, si l'on applique un champ magnétique fort sur un matériau ferromagnétique non magnétisé (point a), il devient aimanté (trajet a-b). A partir du point b, l'aimantation du matériau ne peut plus augmenter : c'est l'aimantation saturante.

Lorsqu'on fait décroître le champ d'excitation, jusqu'à une excitation nulle (point c), une aimantation dite rémanente perdure. Pour annuler l'aimantation rémanente du matériau au point c, il est nécessaire d'appliquer un champ suffisant, dit champ coercitif  $H_c$  de sens opposé à son aimantation (point d).

On distingue les matériaux dits « doux » pour lesquels le champ coercitif est faible, des matériaux dits « durs » pour lesquels il est élevé. Dans le cas d'un matériau dur, le champ magnétique terrestre  $H_t$ , plus faible que  $H_c$  (point g), est trop faible pour modifier l'aimantation  $M$  qui ne varie que légèrement par rapport à son aimantation rémanente (autour du point c), et de manière réversible. En revanche, pour les matériaux doux, le champ magnétique terrestre est suffisamment fort pour modifier le sens de l'aimantation du matériau et celle-ci s'aligne alors sur le champ magnétique terrestre.

### 5.3.2 Signatures magnétiques des véhicules

Un véhicule est un objet magnétique complexe, composé de masses métalliques, comme par exemple la carrosserie, le moteur thermique, ou les essieux, ainsi que d'aimants permanents (Figure 9).



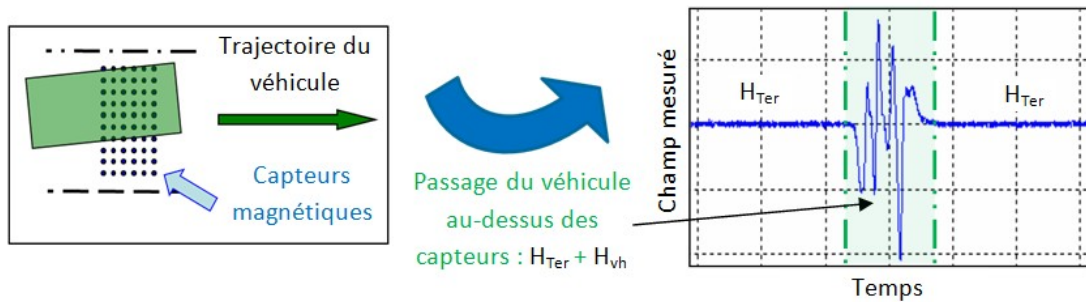
**Figure 9 : Illustration de la présence d'aimants dans les nombreux petits moteurs faisant partie d'un véhicule (Source [YON09])**

Toutes ces masses s'aimantent et perturbent le champ d'induction magnétique terrestre  $H_{Ter}$  (Figure 10). Ainsi, quand un véhicule passe au-dessus d'un capteur magnétique posé ou inséré dans la route, le champ magnétique mesuré par le capteur varie, il mesure alors la somme de  $H_{Ter}$  et du champ magnétique généré par le véhicule  $H_{vh}$  (Figure 11).

Pour un véhicule léger,  $H_{vh}$  est un signal d'amplitude de l'ordre de 25 à 150  $\mu T$ , i.e. de l'ordre de un demi à trois fois le champ magnétique terrestre.



**Figure 10 : Perturbation du champ magnétique terrestre en présence d'un objet métallique**

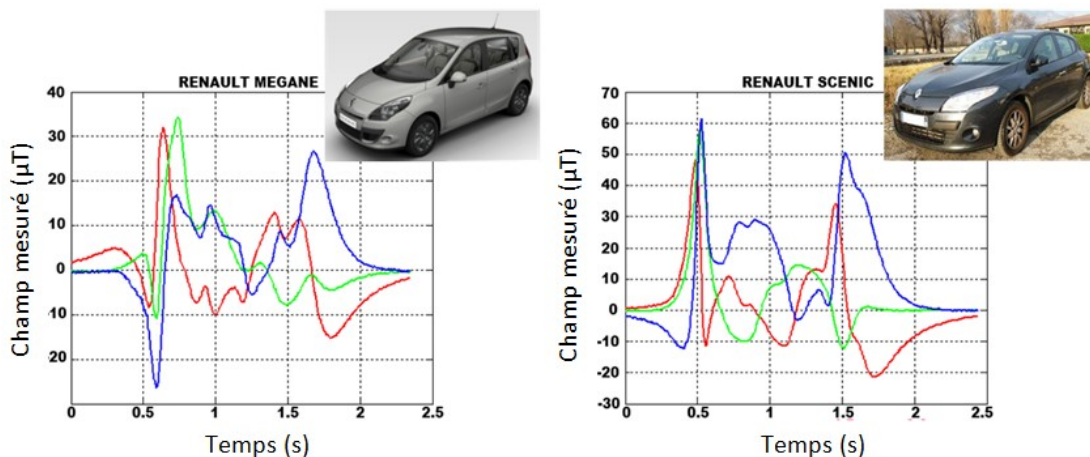


**Figure 11 : Variation du champ magnétique mesuré par un capteur magnétique lors du passage d'un véhicule**

L'aimantation d'un véhicule est dans la majorité des cas composée d'une part d'aimantation induite  $M_{ind}$  et d'une part d'aimantation permanente  $M_{perm}$ .

L'aimantation permanente est très favorable à une application de ré-identification. Comme elle dépend de l'histoire du matériau, elle sera en théorie différente même pour deux véhicules de même modèle. Ainsi, si  $M_{perm}$  est majoritaire dans un véhicule, le signal mesuré au passage d'un véhicule sera bien propre à ce véhicule, et l'on pourra utiliser le terme de « signature magnétique » et faire de la ré-identification.

La Figure 12 montre la variation des signatures magnétiques mesurées pour deux véhicules différents.



**Figure 12 : Variation des signatures magnétiques d'un véhicule à l'autre**

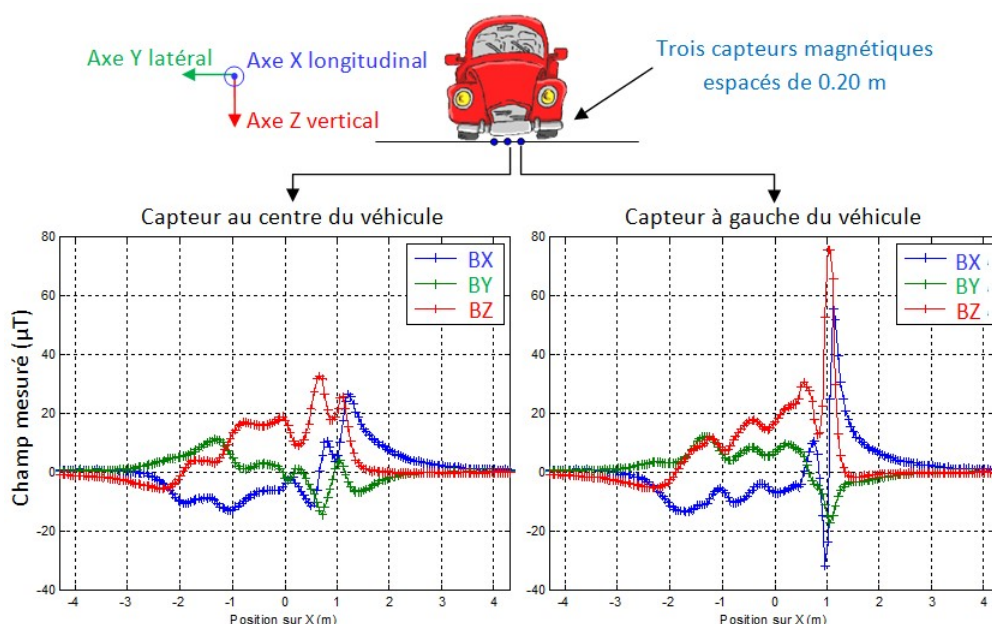
La part d'aimantation induite d'un véhicule peut par contre s'avérer perturbante pour la ré-identification. Si ses composantes horizontales sont importantes, elle va en effet faire varier la signature du véhicule en fonction de son orientation dans le champ magnétique terrestre.

Si la part d'aimantation induite est prépondérante, la ré-identification sera plus difficile dès que le véhicule change d'orientation entre les deux points de mesure (ce qui est le cas lorsqu'on



calcule les matrices origine-destination à un carrefour) car la forme de la signature sera modifiée de manière importante.

De plus, les signatures varient en fonction de la position du capteur sur l'axe latéral de la route, perpendiculaire au passage du véhicule (Figure 13).

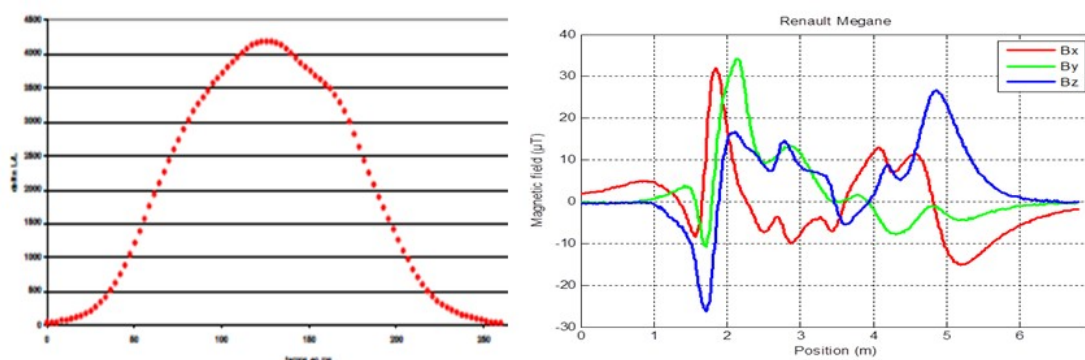


**Figure 13 : Comparaison de la signature magnétique tri-axe d'un véhicule Renault Twingo mesurée par deux capteurs espacés de 0.20 m**

### 5.3.3 Avantages des capteurs magnétiques

Comme les boucles inductives, les capteurs magnétiques mesurent par tous les temps un signal propre au véhicule lorsque celui-ci passe au-dessus d'eux (cf. paragraphe 5.3.2), et permettent de détecter les véhicules [MAR78], de mesurer leur vitesse et de déterminer leur classe [LAO96, CAR99, RIP99], et de les ré-identifier [CHE07, KWO09].

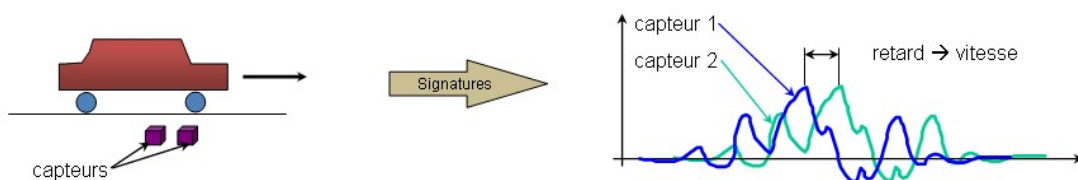
Toutefois, la Figure 14 permet d'illustrer que les signaux magnétiques sont beaucoup plus riches que ceux mesurés par les boucles inductives : elle représente en effet deux signatures de véhicules légers, l'une mesurée par une boucle inductive (à gauche) et l'autre par un capteur magnétique (à droite). La signature inductive n'a que peu de détails, alors que la signature magnétique possède beaucoup d'oscillations.



**Figure 14 : Signatures de deux véhicules légers : boucles inductives (à gauche) [CER07] VS capteurs magnétiques (à droite)**

La fonction « détection » est facilement remplie et par inter corrélation de la mesure de deux capteurs espacés d'une distance connus on peut facilement accéder à la vitesse du véhicule (Figure 15).

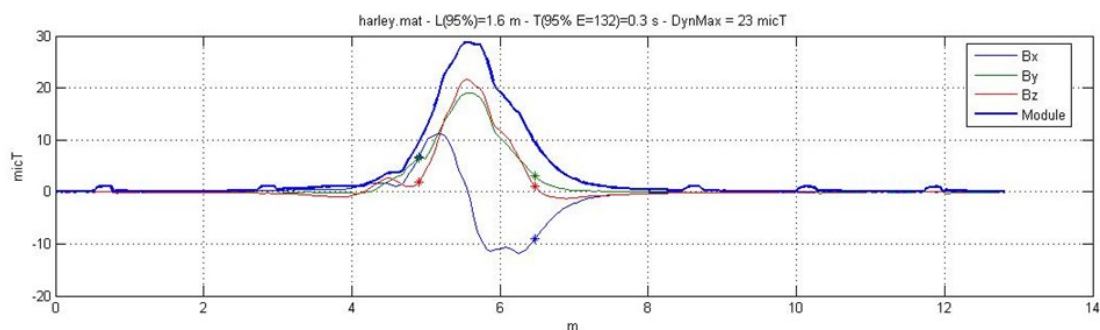




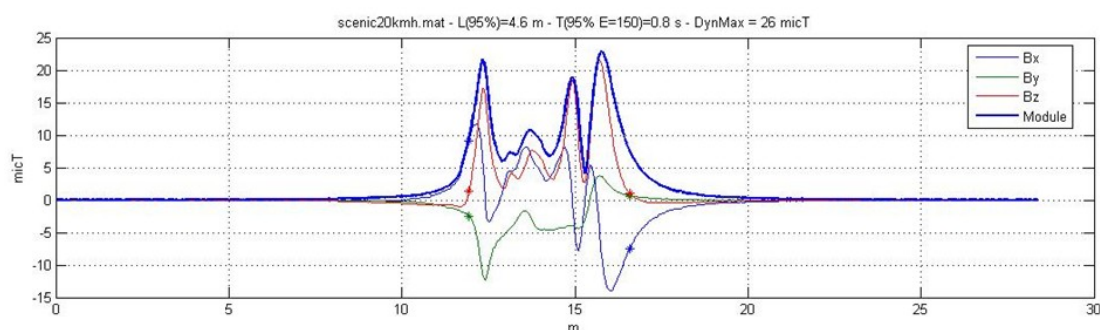
**Figure 15 : Mesure de la vitesse par inter corrélation de deux signatures magnétiques**

Si l'on étudie l'amplitude et plus particulièrement l'extension spatiale des signatures magnétiques des véhicules, on constate aisément que la fonction « classification » est également possible.

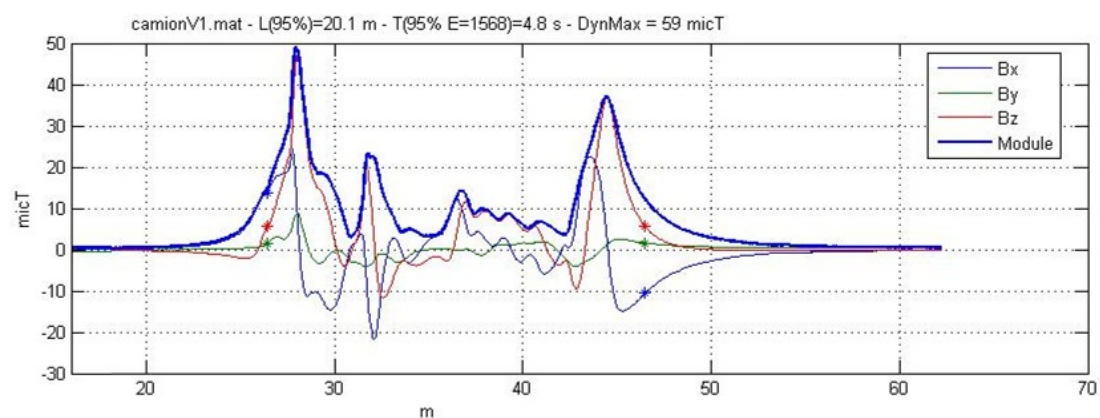
Les figures suivantes (Figure 16,17 & 18) montrent successivement la signature d'une moto, d'une voiture et d'un Camion. L'extension spatiale des signatures est respectivement de 1,60 m pour la moto, 4,60 m pour la voiture et 20,10 m pour le camion.



**Figure 16 : Signature magnétique d'une moto**



**Figure 17 : Signature magnétique d'une voiture**

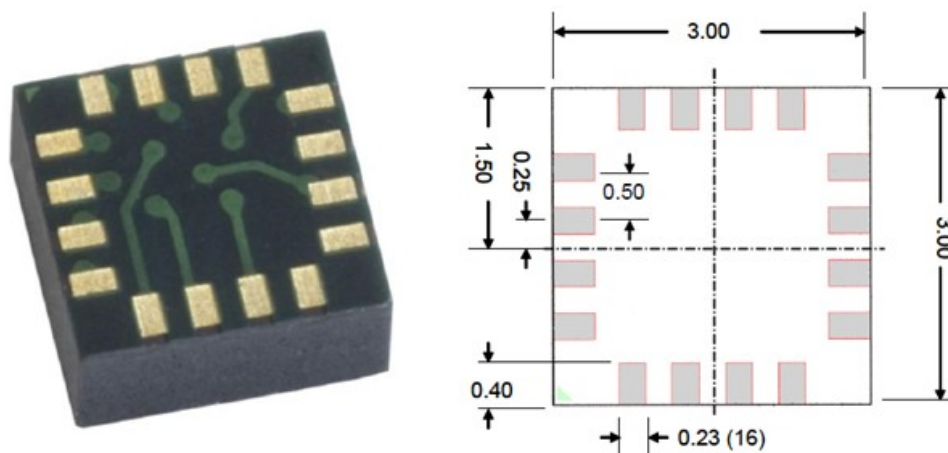


**Figure 18 : Signature d'un camion**

Pour la fonction « ré-identification », il faut être capable de différencier deux véhicules d'une même catégorie, par exemple deux voitures, et pour un véhicule donné pouvoir reconnaître sa signature précédemment acquise (Figure 12).

Générée par l'aimantation du véhicule, la signature magnétique varie au cours du temps sur une échelle de plusieurs mois, mais elle reste constante sur une courte période de temps. Ainsi, elle permet de faire de la ré-identification sur quelques kilomètres tout en respectant la vie privée des conducteurs, car même si une base de données de signatures magnétiques de véhicules était établie (comme pour les plaques d'immatriculation), il faudrait la réactualiser très régulièrement à cause des variations des signaux à long terme.

De plus, des gains économiques importants sont possibles avec l'utilisation de ces capteurs (Figure 19). En effet, leur coût unitaire est de quelques euros et leur installation dans la chaussée ne nécessite qu'un carottage lorsqu'ils sont associés à un système sans fil, ce qui limite le temps d'installation à 10 minutes par capteur [VDC07].



**Figure 19 : Capteur magnétique tri-axe HMC1043 de la marque Honeywell (dimensions en mm)**

#### 5.3.4 Systèmes magnétiques existants

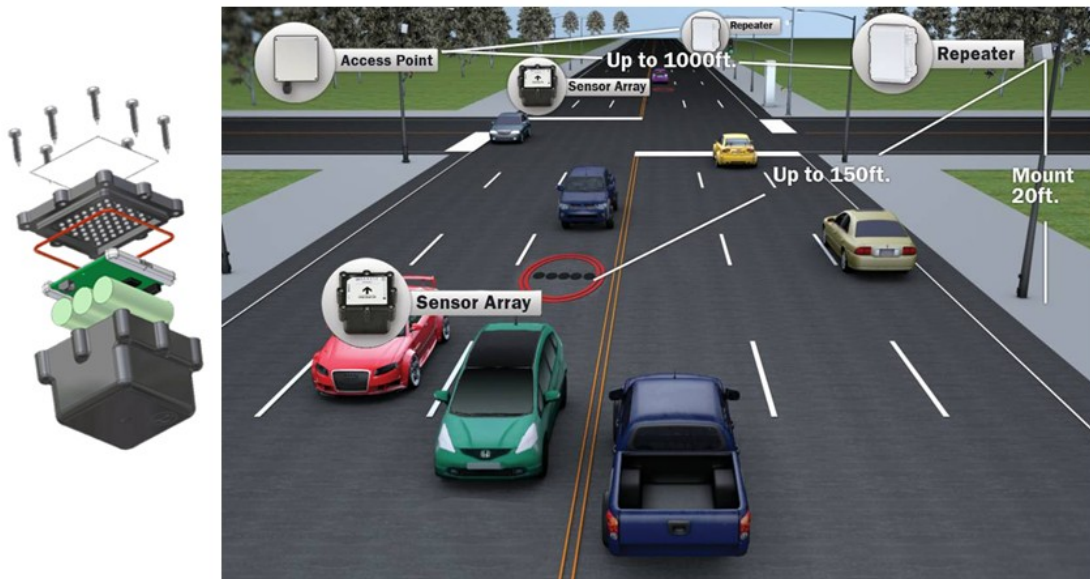
Plusieurs entreprises vendent des capteurs capables de détecter la présence ou le passage de véhicules, de mesurer leurs vitesses, ou de donner leur classe (capteur « NC100/200 » de la société Vaisala [VAI], ex-capteur « Groundhog » de la société Nu-metrics [NUM], capteur « Esquirol » de la société Sterela [STE], capteur « Hi Star NC 200 » de la société Magsys [MAG], ...).

Fondée en 2003, la société Sensys Networks a été en 2007 la première à vendre des capteurs magnétiques tri-axes sans fil permettant de ré-identifier des véhicules et d'en extraire une distribution des temps de parcours (médiane, 80<sup>ème</sup> centile<sup>2</sup>, et 90<sup>ème</sup> centile). Leur système commercialisé est très abouti, avec des temps de parcours et des niveaux de trafic correspondants affichés en temps réel toutes les minutes et intégrés aux cartes Google Maps.

Leurs capteurs s'installent facilement dans la chaussée à l'aide d'un carottage de 10 cm de diamètre et 6.5 cm de profondeur. Ils ont été conçus pour supporter des températures comprises entre -40° C et 85° C [SEN08], et pour pouvoir être extraits de la chaussée si besoin [SEN12].

Ils utilisent une technologie sans fil et les données sont centralisées à l'aide de répéteurs situés au bord de la route (Figure 20).

<sup>2</sup> Les 99 centiles d'un ensemble de valeurs croissantes sont les 99 nombres qui divisent ces valeurs en 100 parts de même taille. Par exemple, le 80<sup>ème</sup> centile est tel que 80% de l'ensemble des données lui sont inférieures.



**Figure 20 : Capteur magnétique Sensys Networks (vue en éclaté) & sa configuration (ligne de 5 capteurs) pour faire de la ré-identification sur un grand axe de circulation (Source <http://www.sensysnetworks.com>)**

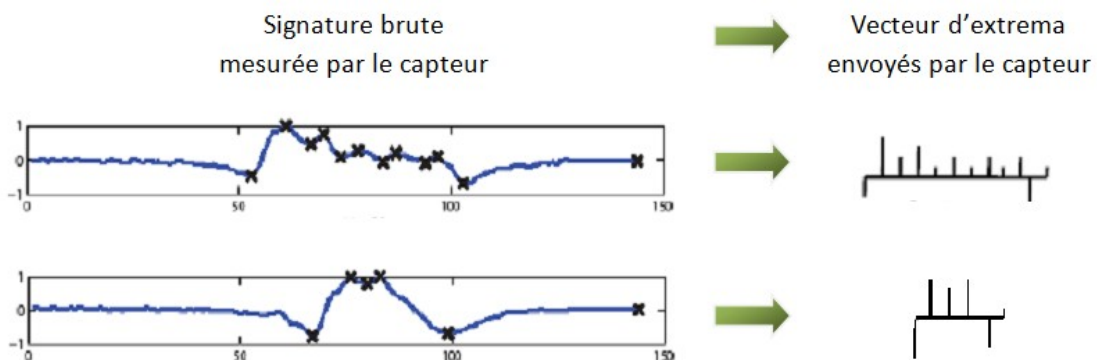
Pour éviter de décharger trop vite la batterie des capteurs (supposée durer 10 ans), Sensys Networks a cherché à optimiser trois caractéristiques : la consommation des cartes électroniques des capteurs, le protocole de communication utilisé, et la quantité de données transmises par les capteurs.

Les cartes électroniques sont composées d'un capteur magnétique, d'un microcontrôleur, d'un émetteur-récepteur radio, d'une antenne, et d'une mémoire [SEN08-2]. La plus grosse consommation de courant a lieu lors de l'échantillonnage du champ magnétique par le capteur magnétique, et lors de la transmission des données par l'émetteur-récepteur [ARR07].

Ainsi, Sensys Networks a choisi de limiter la fréquence d'échantillonnage du capteur magnétique à 128 Hz, fréquence qui leur est parue comme le meilleur compromis entre la quantité d'information nécessaire pour ré-identifier un véhicule et la consommation de la carte. De plus, un microcontrôleur ultra-basse consommation a été sélectionné.

Ensuite, Sensys a conçu son propre protocole de communication pour réduire la consommation due à la transmission de données, tout en conservant une faible latence [SEN08, SEN08-2].

Enfin ils ont limité la quantité de données qui sont transmises par les capteurs sur leur réseau sans fil, en ne gardant que les extrema des signatures magnétiques des véhicules pour faire de la ré-identification (Figure 21).



**Figure 21 : Deux exemples de signature brute mesurée par un capteur Sensys Networks, puis leur version compressée avant transmission sur le réseau : on ne garde que ses extrema (Source P. Varaiya, Sensys Networks)**

Dans son offre commerciale, Sensys Networks annonce des taux de ré-identification de 50 à 70% sur trafic réel avec une ligne de 5 capteurs placée perpendiculairement au passage du véhicule (Figure 20), et sans changement d'orientation des véhicules entre deux points de mesure successifs (les véhicules roulent en ligne droite).

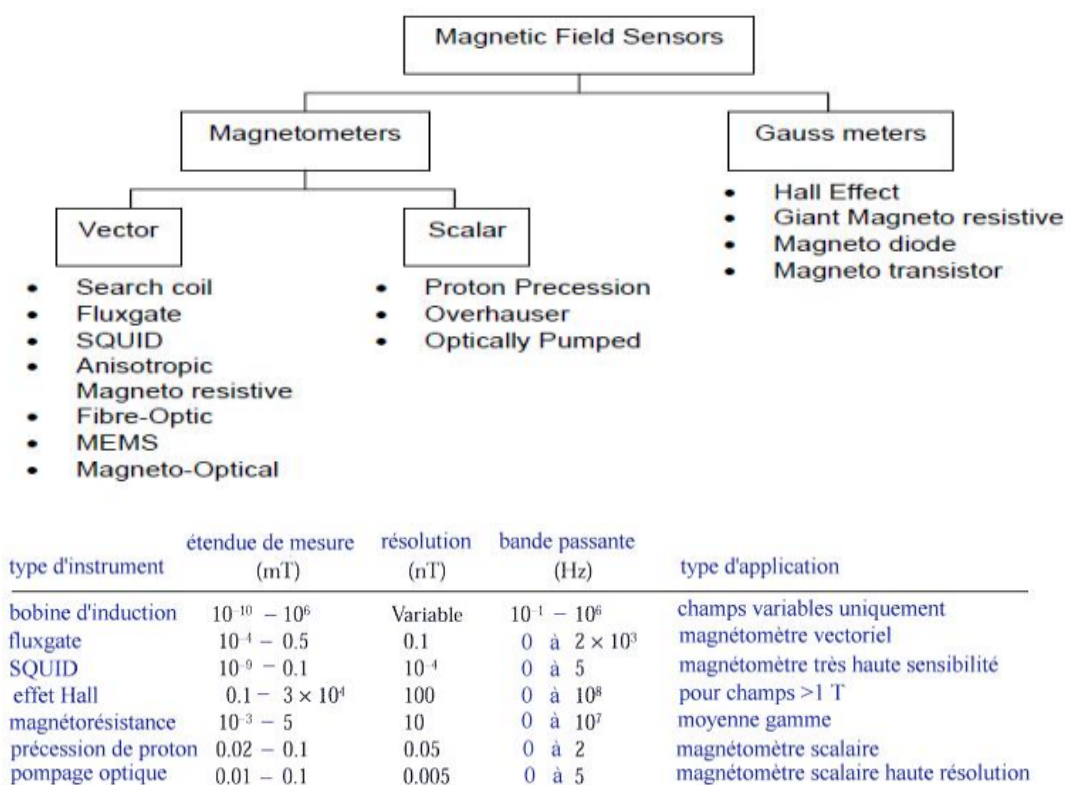
Dans [SAN11], ils ont réussi à apparier 64% des véhicules entre les deux points de mesure successifs, avec toutefois 7% de fausses ré-identifications. Les 36% de véhicules restants n'ont pas été reconnus sur les deux points de mesure à la fois. Ces résultats ont été obtenus avec une ligne de 7 capteurs, toujours placée perpendiculairement au passage du véhicule, mais cette fois-ci dans une bretelle d'accès donc avec un changement d'orientation du véhicule (les véhicules ont tourné entre les deux points de mesure).

D'après l'étude indépendante [REM11], les taux seraient plutôt de 38 à 48% avec 2 à 6% d'erreurs en ligne droite, mais ces 2 à 6 % d'erreurs de ré-identification n'entraînent que 0.03 à 1.3% d'erreur d'estimation des 25<sup>ème</sup>, 50<sup>ème</sup> et 75<sup>ème</sup> centiles de la distribution des temps de parcours.

### 5.3.5 Choix du capteur magnétique

Afin d'exploiter les propriétés magnétiques évoquées précédemment, il est nécessaire de se doter des moyens pour réaliser une mesure la plus précise possible du champ magnétique.

Il existe différentes technologies de capteurs magnétiques : les capteurs à effet Hall, les capteurs à effet magnétorésistif, les magnétodiodes, les magnétotransistors, les SQUIDs, les microfluxgates et les capteurs à structure résonante. Les différents types de technologies ainsi que leurs performances et applications sont indiqués **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**



**Figure 22 : Caractéristiques et application des différents capteurs**

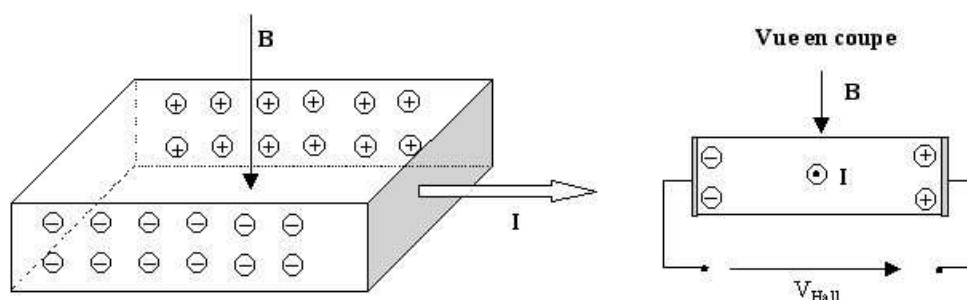
Les fluxgates et les SQUIDs sont les magnétomètres les plus performants, mais les magnétomètres à effet Hall, sensibles et linéaires et les magnétorésistances, sensibles mais non linéaires, sont les capteurs magnétiques les plus utilisés dans le secteur industriel.

Les magnétomètres à SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) sont parmi les dispositifs les plus sensibles pour la mesure des champs magnétiques. Ils donnent accès à la mesure de la variation du champ et non à sa valeur. L'un des principaux obstacles à l'utilisation de ce type de capteur est la nécessité d'une enceinte cryogénique à l'azote liquide (à environ 80° K).

Les capteurs à structure résonante sont basés sur une structure mécanique MEMS<sup>3</sup>. Ils mesurent l'apparition ou la perturbation d'une fréquence de résonance de la structure causée par l'effet d'un champ magnétique local. La détection et l'analyse de cette perturbation permettent ensuite de remonter au champ magnétique appliqué.

#### 5.3.5.1 Les capteurs à effet Hall

Cet effet a été découvert par Edwin Herbert Hall en 1879. Les capteurs à effet Hall exploitent la force de Lorentz qui fait tourner les électrons autour du champ magnétique. Pour ce faire, on fait parcourir un courant électrique  $I$  dans une plaque conductrice (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En présence de champ magnétique  $B$ , la trajectoire des électrons est déviée par le champ magnétique. Il en résulte une accumulation de charge sur l'une des faces de la plaque, ce qui est à l'origine d'une différence de potentiel  $U$  (tension de Hall) entre cette face et la face opposée.



**Figure 23 : Capteur à effet Hall**

La tension de Hall est proportionnelle à l'intensité du courant  $I$  et au champ magnétique  $B$  et inversement proportionnelle à l'épaisseur du barreau.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques de trois produits du commerce.

Modèle	Gamme de mesure	Sensibilité	Type
Sentron AG, 2SA-10	$\pm 45 \text{ mT}$	-	Effet hall, bi-axes
Sentron AG, CSA-1V	$\pm 7.5 \text{ mT}$	-	Effet hall, mono-axes
Analog device, AD22151G	$\pm 300 \mu\text{T}$	0.4 mV/G	Effet hall

**Tableau 2 : Caractéristiques de trois capteurs à effet Hall du commerce**

#### 5.3.5.2 Les capteurs magnétorésistif

La magnétorésistance est la capacité de certains matériaux à avoir une résistivité qui est fonction de l'angle entre le courant qui traverse ce matériau et son aimantation.

##### 5.3.5.2.1 Les AMR (Magnéto-Résistance Anisotrope)

Lors de la fabrication des capteurs AMR, on utilise un matériau de type permalloy qui présente une magnétorésistance importante. Un fort champ magnétique est appliqué sur ce matériau

<sup>3</sup> Micro-Electro-Mechanical System (Microsystème électromécanique)



dans une direction afin de le rendre anisotrope. Il existe ainsi un axe de facile aimantation appelé axe d'aimantation privilégiée.

Lorsqu'un champ magnétique extérieur est appliqué sur le capteur, l'aimantation du permalloy varie et n'est plus orientée selon l'axe d'aimantation privilégiée. Cela a pour effet de faire varier l'angle entre l'aimantation et le courant et donc de faire varier la résistance électrique. Cette méthode permet de connaître l'amplitude du champ magnétique appliqué perpendiculairement à l'axe d'aimantation privilégiée en mesurant les variations de résistance. On peut appliquer un pont de Wheatstone pour améliorer la précision, en utilisant 4 éléments sensibles.

Ces capteurs sont légers, petits, pas chers et consomment peu. Ils peuvent être utilisés à des températures allant jusqu'à 200 °C. Ils existent surtout en couche mince et présentent une forte sensibilité pour les faibles valeurs champ.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques de trois produits du commerce.

Modèle	Gamme de mesure	Résolution	Type
Honeywell, HMC 1051 Z	$\pm 600 \mu T$	11 nT	mono-axe
Honeywell, HMC 1052	$\pm 600 \mu T$	11 nT	bi-axe
Honeywell, HMC 1053	$\pm 600 \mu T$	11 nT	tri-axe

**Tableau 3 : Caractéristique de trois capteurs AMR du commerce**

#### 5.3.5.2 Les capteurs GMR (Magnéto-Resistance Géante)

Les magnétorésistances géantes (GMR) sont composées d'un empilement de couches ferromagnétiques et de couches non magnétiques. En l'absence de champ magnétique extérieur, l'aimantation de deux couches mitoyennes est antiparallèle, du fait de l'interaction magnétique entre ces couches. Lorsqu'un champ magnétique extérieur est appliqué, l'aimantation de ces couches devient parallèle et la résistance du matériau diminue. Ces capteurs sont appelés magnétorésistances géantes car leur sensibilité est plus importante que celle des AMR.

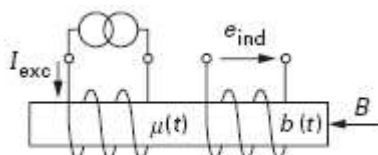
Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques de trois produits du commerce.

Modèle	Gamme de mesure	Sensibilité ((mV/V)/G)	Type
NVE corporation, AA003-02	1.4 mT	3.2	mono-axe
NVE corporation, AA005-02	7 mT	0.65	mono-axe
NVE corporation, AAH002-02	0.3 mT	13	mono-axe

**Tableau 4 : Caractéristique de trois capteurs GMR du commerce**

#### 5.3.5.3 Les capteurs fluxgate

Les capteurs à porte de flux « fluxgate » étaient à l'origine utilisés en aéronautique comme boussoles électroniques de précision. Leur principe repose sur la saturation des matériaux ferromagnétiques. Ces capteurs sont composés d'un matériau ferromagnétique très doux de perméabilité  $\mu$  élevée de forme cylindrique. Ce cylindre est entouré d'un bobinage d'excitation et d'un bobinage auxiliaire (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

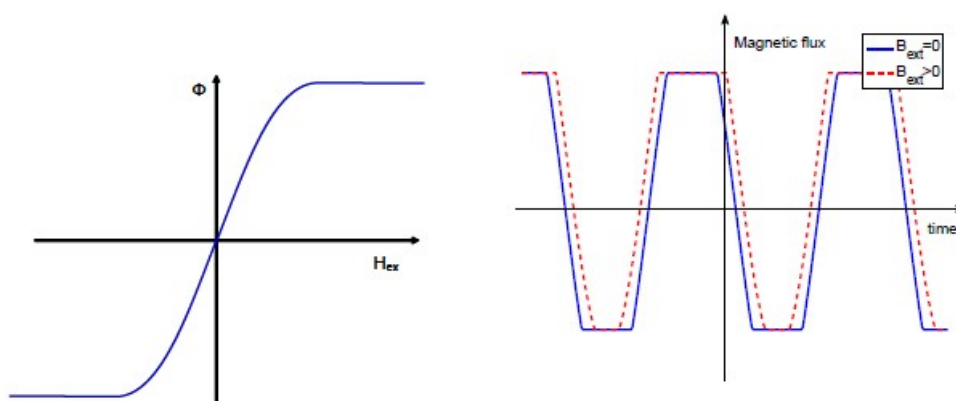


**Figure 24 : Capteur fluxgate**

La bobine d'excitation est traversée par un courant alternatif dont la fréquence, dite fréquence d'excitation a une valeur de quelques dizaines de  $kHz$ . L'amplitude du courant traversant la bobine d'excitation est suffisamment élevée pour saturer le matériau. Le courant étant alternatif, le matériau est alternativement saturé positivement et négativement à la fréquence d'excitation.

D'après la loi de Faraday, la tension aux bornes du bobinage auxiliaire correspond à la dérivée temporelle du flux d'induction magnétique. Les zones temporelles où le champ d'induction est saturé correspondent à une tension nulle aux bornes du bobinage auxiliaire. En revanche les transitions entre deux zones de saturation correspondent à des impulsions de la tension du bobinage. Ce sont ces impulsions qui sont utilisées pour calculer le champ magnétique.

Lorsqu'il est nul selon l'axe du capteur, le matériau est saturé dans les deux directions avec la même proportion temporelle. La tension aux bornes du bobinage auxiliaire est donc une alternance d'impulsions positives et négatives espacées à intervalles réguliers. En revanche en présence d'un champ magnétique extérieur, le matériau est soumis à la somme de ce champ extérieur et du champ d'excitation. En conséquence le matériau est plus longtemps saturé dans une direction que dans l'autre et la longueur des intervalles entre les impulsions varient (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).



**Figure 25 : Signal aux bornes du bobinage auxiliaire en présence et en absence de champ extérieur**

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques de trois produits du commerce.

Modèle	Gamme de mesure	Sensibilité ((mV/V)/G)	Type
NVE corporation, AA003-02	$\pm 0.1 \text{ mT}$	-	tri-axe
NVE corporation, AA005-02	$\pm 0.5 \text{ mT}$	-	tri-axe
NVE corporation, AAH002-02	$\pm 0.1 \text{ mT}$	-	tri-axe

**Tableau 5 : Caractéristique de trois capteurs fluxgate du commerce**

#### 5.3.5.4 Tableau comparatif

Effet Hall	Magnéto-résistance	Micro-
------------	--------------------	--------

		AMR	GMR	Fluxgate
Gamme <sup>4</sup>	100 $\mu$ T – 10 T	0.1 $\mu$ T – 1 mT	1 $\mu$ T – 10 mT	0.1 nT – 1 mT
Densité de bruit <sup>5</sup>	10 nT – 100 $\mu$ T / $\sqrt{\text{Hz}}$	1 – 10 nT / $\sqrt{\text{Hz}}$		1 nT / $\sqrt{\text{Hz}}$
Dérive en Température	100 – 1 000 ppm / °C	3 000 ppm / °C		< 100 ppm / °C
Sensibilité chocs magnétiques	Faible	Forte		Faible
Coûts 2010	0,1 – 5 \$ (0,08 – 3,8 €)	1 – 10 \$ (0,8 – 7,6 €)		10 – 100 \$ (7,6 – 76 €)

**Tableau 6 : Principales caractéristiques des micro-magnétomètres [LEG11, MSA09, JAG07]**

<sup>4</sup> Plage des mesures de champs magnétiques qui sont possibles avec le capteur.

<sup>5</sup> Densité spectrale du bruit présent dans le signal, rapporté à une bande passante de 1Hz.



A titre d'information, pour mesurer les signatures magnétiques des véhicules figurant dans ce rapport, nous avons utilisé des « Star Watch » (Figure 26), prototypes de capteurs sans fil tri-axes conçus au CEA-Leti en 2006 à partir de capteurs AMR de la marque Honeywell.



*Figure 26 : Photo d'un capteur Star Watch tri-axe*

#### **5.3.6 Perspectives**

Le développement des capteurs sur silicium en très grandes quantités a permis l'effondrement du coût des capteurs à effet Hall. Ces capteurs coûtent environ 0,50 \$/pièce aujourd'hui.

Le coût des capteurs AMR et GMR sur puce silicium est plus élevé, entre 1 et 3 \$ / pièce. En réalité, ces capteurs ne présentent pas une complexité de fabrication plus importante que les capteurs à effet Hall. On estime que la principale raison pour laquelle ces capteurs sont plus coûteux que les capteurs à effet Hall est qu'ils sont produits en plus faibles quantités.

Il est donc raisonnable de penser que le prix des capteurs GMR va diminuer d'ici quelques années sous l'effet de leur importante utilisation en automobile et dans les nouveaux équipements électroniques (électroménager, téléphonie mobile, etc...).

#### **5.4 Conclusion identification des véhicules**

Les progrès réalisés dans la construction de capteurs magnétiques de faibles dimensions et de faible coût ouvrent le champ de l'utilisation du magnétisme, en particulier dans le domaine de la « route intelligente ».

Les micro-magnétomètres représentent une opportunité réelle d'innovation dans le domaine de la gestion du trafic. Enfoui dans la chaussée ce type de capteur peut permettre de détecter et d'estimer la vitesse de véhicules par la mesure directe de la déformation du champ magnétique terrestre au passage d'une masse métallique.

Depuis peu, des solutions sont disponibles sur le marché (capteurs Sensys) et proposent surtout des fonctions de détection de passage des véhicules légers. En revanche, pour ce qui est de la détection des deux roues motorisés et la classification de véhicules, aucun résultat probant n'est disponible à ce jour.

De nombreux progrès peuvent être faits à court terme, que ce soit en termes de performances métrologiques ou bien d'autonomie énergétique pour conduire à des durées de vie de 5 à 7 ans sans changer la batterie, ce qui est un avantage indéniable pour une méthode intrusive. Ces capteurs magnétiques présentent l'intérêt d'être miniatures, quelques cm<sup>3</sup>, et faciles à installer par rapport à des boucles magnétiques notamment.

## **6 TECHNOLOGIES DE COMMUNICATION VEHICULES VERS INFRASTRUCTURES ET LES COMMUNICATIONS ENTRE LES CAPTEURS**

### **6.1 Approche**

Les capteurs autonomes comprennent une partie permettant la transmission sans fil des données collectées. Cette partie assure différentes fonctions et comprend des éléments caractéristiques dont certains sont critiques pour leur adoption dans les applications industrielles du domaine des transports.

Pour chacun des thèmes indiqués dans le plan, une comparaison qualitative et quantitative sera faite pour les différentes technologies retenues. La consommation (et son profil dans le temps) dans le cadre des scénarios typiques d'utilisation sera estimée pour fournir un ordre de grandeur de la génération et du stockage d'énergie nécessaires.

Le choix d'une technologie de communication radio dépendra principalement des éléments suivants :

1. Coût,
2. Caractéristiques techniques,
3. Compatibilité avec un standard existant,
4. Encombrement.

Le compromis dépend fortement du contexte applicatif et si celui-ci est très contraint, le point 3 doit être oublié.

Le point 2 est, à ce stade, celui qui présente le plus de liberté (ou d'inconnues). Parmi les caractéristiques techniques les plus importantes, nous pouvons noter, au niveau applicatif :

1. Le débit d'information (minimum, maximum, net au niveau de l'application, brut sur le canal...),
2. La portée (moyenne, dispersion, pour quelle taille d'antenne, quelle puissance d'émission, quelle sensibilité, quel milieu de propagation...),
3. La disponibilité du lien (rejet des utilisateurs intentionnels ou non du spectre, de ses propres systèmes, contraintes normatives et du protocole...).
4. La source d'alimentation en énergie.

Enfin, dans notre contexte de faible consommation, il est essentiel de mettre l'accent sur la partie du protocole de communication qui gère l'accès au canal : les spécifications et la réalisation de cette couche algorithmique sont souvent porteuses des gains les plus importants en termes de consommation.

### **6.2 Fonctions et éléments critiques**

Les fonctions attendues de la part de l'application sont essentiellement liées à la transmission d'informations identifiées vers une destination particulière. Des acquittements et des mécanismes associés (retransmission, validation, etc.), ainsi que la vérification périodique du bon fonctionnement du système (live-list) sont également envisagés.

D'un point de vue technologique, les paramètres influant sur les performances du système, que ce soit en termes fonctionnels ou non fonctionnels comme la consommation, sont les suivants :

- Caractéristiques de propagation
- Bande(s) de fréquence et modulation utilisée
- Portée (milieu de propagation – vue directe, bâtiment, etc.)
- Sensibilité aux perturbations, robustesse (diversité, etc.)
- Perturbations provoquée dans le milieu et l'environnement applicatif
- Modèle de communication, adressage, identification des nœuds, identification des informations
- Gestion des erreurs (lors d'un transfert ou lors de l'absence ou de la disparition d'un nœud du réseau)
- Contraintes normatives (rayonnement, CEM, utilisation des bandes de fréquence, etc.)
- Consommation instantanée (en veille, en veille profonde, en réception, en émission) ainsi que la durée du réveil du système (fréquence de réveil maximum, due notamment

au temps de retournement, à la latence de réveil et de mise en veille, et à leur consommation respective)

- Lien avec la gestion de l'énergie (voir chapitre à ce sujet)

Un paramètre essentiel à prendre en compte lors de tout choix portant sur la communication sans fil (et pas uniquement à ce niveau) est le cycle de fonctionnement de l'application (duty-cycle).

### 6.3 Autres paramètres

Les types de liens envisagés dans les systèmes autonomes communicants peuvent être multipoint, point à point, diffusion, etc. La liste des services inclue le transfert d'information et la gestion du réseau (attribution d'adresses, auto-organisation, surveillance de paramètres du réseau, sécurité, etc.)

D'autres paramètres peuvent influencer sur le choix d'une technologie, surtout lorsque l'utilisation de composants du marché est envisagée. On trouve par exemple :

- Fonctionnement et fiabilité dans les conditions d'exploitation envisagées (température, humidité, MTBF)
- Mécanismes de sécurité, en particulier confidentialité, identification des parties, authentification, etc.
- Encombrement, taille de l'antenne, poids (Volume, géométrie)
- coûts de revient (y inclus licences, redevance)
- Technologie électronique
- Protocoles utilisés
- Interconnexion et interopérabilité
- Modèle de communication natif (par exemple client-serveur ou producteur-consommateur)
- Fournisseurs et disponibilité
- Maturité, développements nécessaires afin d'obtenir une solution industrialisable
- Pérennité

### 6.4 Liste des solutions RF

#### 6.4.1 Solutions discrètes récepteur à diode Schottky

##### 6.4.1.1 Description générale

Etant donné le faible débit d'information et la nature souvent intermittente des données à transmettre, la contrainte de consommation se trouve principalement au niveau du récepteur.

La façon la plus extrême de limiter cette consommation est d'utiliser un récepteur à diode, technique encore largement utilisée dans les tags RF pour son faible coût. Celle-ci ne demande que quelques mA voire aucun courant de polarisation (cf. [AN 1089]) auquel il faut ajouter le courant d'un amplificateur-comparateur qui peut rester en dessous du mA pour un faible débit brut et la consommation dynamique d'une machine d'état ou micro-contrôleur cadencé à très basse fréquence.

Etant donné la bande passante importante du récepteur, l'émetteur en vis-à-vis peut se limiter à quelques transistors réalisant un oscillateur à résonateur céramique coaxial avec un amplificateur.

Les performances typiques qu'on peut attendre de ce type de solution sont :

Puissance d'émission	de 1mW à 100mW
Sensibilité en RX	-50dBm.
Portée en champ libre	de <10m, line-of-sight.
Consommation en mode RX	de 1 à 4mA, sans $\mu$ C
Consommation en mode TX	de 15 à 50mA, sans $\mu$ C.

**Tableau 7**

#### **6.4.2 Avantages et inconvénients**

Outre sa faible consommation, le principal avantage est le coût, bien en dessous de 1€ (sans filtre à onde de surface) pour le récepteur et à peine plus cher pour l'émetteur.

Le principal inconvénient est la faible sélectivité de la solution puisque le filtrage de pré-détection est réalisé sur porteuse : ceci le rend très sensible à tout perturbateur. Cette sensibilité aux perturbation s'étend aussi aux signaux dans la bande, même plus faibles que le signal à recevoir : mauvaise immunité hors et dans la bande. La sensibilité est aussi très faible et limite de beaucoup la portée. La modulation est limitée à de l'On-Off-Keying, éventuellement avec une seconde modulation (Manchester, PWM, FSK...). Un seul canal fréquentiel est possible.

Le protocole est libre : cela permet une adaptation fine à l'application mais demande un effort de développement.

#### **6.4.3 Fournisseurs et produits**

La diode elle-même peut provenir de nombreux fabricants (Agilent Semiconductor, Vishay Semiconductor, M-pulse, Macom...) et il est souvent possible de trouver des multi-sources. Pour le reste du récepteur, le choix est encore plus ouvert. Pour le résonateur céramique coaxial, de nombreux fabricants existent aussi (EPCOS, Murata...)

#### **6.4.4 Solutions discrètes, récepteur super-réaction**

##### **6.4.5 Description générale**

Le cadre est le même que celui du détecteur à diode (pas de conversion de fréquence, On-Off-Keying uniquement) en remplaçant la diode par un oscillateur en phase de démarrage. Cet oscillateur doit être éteint le plus tôt possible après avoir démarré pour minimiser la consommation. Ce cycle correspond à un échantillonnage de la puissance RF injectée et doit donc être suffisamment rapide pour pouvoir accepter le débit brut à recevoir. La constante de temps de l'asservissement du signal d'extinction impose pratiquement un fonctionnement en continu du récepteur.

L'émetteur peut-être à base de circuit intégré à synthèse de fréquence ou à multiplication de fréquence quartz. La mise au point est souvent difficile à cause des raies parasites émises. Il peut aussi être à base de résonateur à onde de surface.

Les performances typiques qu'on peut attendre de ce type de solution sont :

Puissance d'émission	de 1mW à 100mW
Sensibilité en RX	-80 à -90dBm.
Portée en champ libre	de 30 à 100m, line-of-sight.
Consommation en mode RX	de 50 à 200 mA, sans $\mu$ C
Consommation en mode TX	de 15 à 50mA, sans $\mu$ C.

**Tableau 8**

##### **6.4.5.1 Avantages et inconvénients**

Outre sa faible consommation, le principal avantage peut-être le coût suivant les performances et la stabilité attendues.

Pour le récepteur, le principal inconvénient est la difficulté de production et d'une manière générale la stabilité. La bande passante équivalente sur la porteuse est en effet relativement étroite et dépend d'une fréquence de résonance RF sensible aux capacités parasites, ce qui demande en pratique un réglage en production. Les dérives en température et humidité sont aussi difficiles à maîtriser. Ensuite, si la bande passante est apparemment faible (comparée à une simple détection), elle s'élargit avec la puissance du signal reçue ce qui diminue fortement l'immunité hors-bande. L'immunité dans la bande reste aussi mauvaise que celle d'une simple détection. Un seul canal fréquentiel est possible.

En fait, il existe des solutions super-hétérodynes intégrées de bien meilleures performances consommant aussi peu en moyenne avec un protocole d'accès au médium adéquat : il suffit d'observer l'activité RF dans le canal avec un rapport cyclique qui permet de diminuer la consommation d'autant (ce gain sur la consommation est réduit en pratique par le temps de démarrage du récepteur).

Le protocole est libre : cela permet une adaptation fine à l'application mais demande un effort de développement.

#### 6.4.5.2 Fournisseurs et produits

Il existe de nombreux fournisseurs pour les composants utilisés qui peuvent être choisis multi-sources.

### 6.4.6 Modules

#### 6.4.6.1 Description générale

Il existe de nombreux fabricants de modules RF, qui peuvent s'adapter à diverses applications. Ils proposent en général des performances proches, pour les bandes de fréquences 433 – 868 – 915 MHz et 2.4 GHz.

Le facteur de forme de ces modules varie, mais est souvent réduit à ~ 4 cm x 3 cm avec une antenne constituée d'un dipôle filaire qui doit être intégré dans le boîtier.

Les performances typiques qu'on peut attendre de ce type de module sont :

Puissance d'émission	de 1 mW à 100 mW
Sensibilité en RX	de -90 dBm à -110 dBm.
Portée en champ libre	de 50 m à 1 km, line-on-sight.
Consommation en mode RX	de 10 à 30 mA, incluant un $\mu$ C
Consommation en mode TX	de 15 à 50 mA, incluant un $\mu$ C.
Type de $\mu$ C compagnon	8-bits, RISC, ADC, un ou plusieurs UART.

**Tableau 9**

#### 6.4.6.2 Avantages et inconvénients

Le principal avantage de ce type de solution est la disponibilité et la souplesse de la mise en place d'une solution RF.

Les principaux inconvénients sont le prix souvent élevé ( ~ 10 € pour les moins chers ) et le compromis en performances à trouver, qui n'est souvent pas ce dont l'application considérée a besoin.

#### 6.4.6.3 Fournisseurs et produits

La liste des fournisseurs suivantes n'est pas exhaustive, mais comprend les principaux fabricants / revendeurs de ces solutions.

Mipot	: <a href="http://www.mipot.com">www.mipot.com</a>
Radiometrix	: <a href="http://www.radiometrix.co.uk">www.radiometrix.co.uk</a>
Wood & Douglas	: <a href="http://www.woodanddouglas.co.uk">www.woodanddouglas.co.uk</a>
Adéunis RF	: <a href="http://www.adeunis-rf.com">www.adeunis-rf.com</a>
LS Research	: <a href="http://www.lsr.com">www.lsr.com</a>
Circuit design	: <a href="http://www.circuitdesign.co.jp">www.circuitdesign.co.jp</a>
Radiotronix	: <a href="http://www.radiotronix.com">www.radiotronix.com</a>
Warwick Wireless	: <a href="http://www.radiotelemetry.co.uk">www.radiotelemetry.co.uk</a>

Souvent, ces fabricants proposent des solutions pour les bandes ISM, mais également des modules pour Bluetooth, 802.11, GSM, GPRS etc ....

## 6.4.7 NanoNet

### 6.4.7.1 Description générale

NanoNet (<http://www.nanotron.com>, Allemagne) est un ensemble de protocoles propriétaires pour les réseaux de capteurs sans fil à 2,4 GHz. Les applications visées sont le contrôle industriel de procédés, la domotique, les applications de RFID actifs, la mesure à distance, etc. Le protocole de contrôle d'accès au médium est de type CSMA/CA avec *Exponential Backoff* et *Virtual Carrier Sensing*. TDMA est aussi proposé, ainsi qu'un mode hybride implémentant CSMA au-dessus de TDMA. Il est possible de crypter les données et les paquets sont protégés par CRC et FEC. La longueur des paquets varie de 1 à 8192 octets.

Le débit varie entre 500 kbit/s et 2 Mbit/s. La portée est de 900 m à l'extérieur et 60 m à l'intérieur à 1 Mbit/s à la puissance maximale.

La consommation est de 1,5 µA en veille profonde, de 2,4 mA en veille, 10 mA en mode prêt, 35 mA en réception, 82 mA (NanoNet TRX) ou 78 mA (NanoPAN 5360 et 5361) en émission.

### 6.4.7.2 Avantages et inconvénients

Peu d'informations sont disponibles au sujet de NanoNet. Cela met en doute le choix de cette technologie.

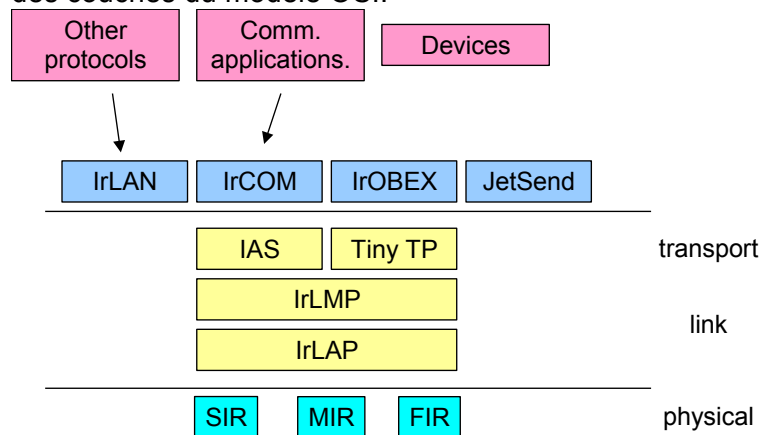
### 6.4.7.3 Fournisseurs et produits

NanoTron propose deux produits basés sur cette technologie. Le transmetteur NanoNET TRX constitue le cœur de la solution NanoNET. Il s'agit d'un module radio. Les modules NanoPAN 5360 et 5361 (les deux ont des puissances maximales de sortie et des sensibilités différentes) possèdent un nœud NanoNET et sont packagés avec un connecteur d'antenne 50 ohms.

## 6.4.8 Infrared Data Association

### 6.4.8.1 Description générale

IrDA est une norme largement acceptée et utilisée pour offrir des liaisons sans fil à courte distance entre des dispositifs numériques qui sont en visibilité directe. IrDA couvre l'ensemble des couches du modèle OSI.



**Figure 27 : Couches spécifiées dans IrDA**

Les débits offerts sont variés :

- de 2.4 à 115.2 Kbit/s codé en « Return to Zero Inverted » (RZI). La trame est composée de caractères envoyés de manière asynchrone.
- de 0.576 à 1.152 Mbit/s codé en « Return to Zero Inverted » (RZI) coded La transmission de la trame est faite de manière synchrone (cf. Figure 28). Le remplissage est fait comme dans HDLC et le CRC est un 16-bit CCITT.
- 4 Mbit/s ou « Fast IrDA » (modulation de position sur 4 positions), qui n'offre pas de mode de sauvegarde de l'énergie. La transmission de la trame est faite de manière

synchrone (cf. Figure 29). Le préambule, le début et la fin de trame sont différents des versions ci-dessus et le CRC est un 32-bit IEEE.

0x C0 0n EE	CO	sqql622 (8)	ql (8)	q9t9 (<5040)	CBC (10)	CJP
-------------	----	-------------	--------	--------------	----------	-----

**Figure 28 : trame de caractères asynchrones**

01111110	01111110	address (8)	ctrl (8)	data (<2046)	CRC (16)	01111110
----------	----------	-------------	----------	--------------	----------	----------

**Figure 29 : trame synchrone**

Le mécanisme de liaison de IrDA est inspiré de celui de HDLC en mode NRM. Les services disponibles aux alentours peuvent être découverts. Les services de transferts sont avec ou sans garantie. Le modèle de communication est orienté connexion ; le mode point à point utilise les concepts de stations primaire et secondaire. Le mode multipoints étend le précédent en autorisant la présence simultanée de plusieurs stations secondaires.

#### 6.4.8.2 Avantages et inconvénients

IrDA est très bon marché et peut être facilement intégré à un design existant, via les ports UART par exemple. Il est donc utilisé sur de nombreux dispositifs. Néanmoins, il souffre de sa faible portée (1 m environ) et de la contrainte de visibilité directe. Cette dernière contrainte peut également être considérée comme un avantage dans les applications où le confinement du signal est nécessaire (en général pour des raisons sécurité et de confidentialité.) On note parfois l'apparition de problèmes de propagation dans certains milieux, comme des lieux éclairés par des lampes fluorescentes ou directement par le soleil. En général, seul le mode point à point est supporté.

Alr (Advanced Infrared) [Ozogur 99, Gfeller 00] est une évolution intéressante proposée par l'IrDA, puisque sa portée correspond à une pièce entière environ. Alr utilise pour cela une lumière infrarouge à impulsion de position à 4 tranches. Il permet les communications multipoints et son MAC est similaire à celui de 802.11 DCF. Il n'offre donc pas de garantie sur le trafic. La contrainte de visibilité directe peut être contournée en utilisant un répéteur satellite. Alr est une alternative à Bluetooth.

#### 6.4.8.3 Fournisseurs et produits

### 6.4.9 Ultra-Wide Band

Ultra-Wide Band (UWB, ultra-large bande) est une technologie assez ancienne qui a émergé récemment. Les portées envisagées sont assez courtes (moins de 10 m.) Plutôt que d'utiliser des fréquences porteuses, Ultra-Wide Band utilise une large portion du spectre pour émettre. Cela rend théoriquement la couche physique peu sensible aux parasites habituellement rencontrés. Deux versions d'UWB existent : ultra-large bande à impulsion (Impulse-UWB) et ultra-large bande en modulation de fréquence (FM-UWB).

#### 6.4.10 FM-UWB, l'exemple du CSEM

Les avantages de la solution FM-UWB développée au CSEM sont : véritable faible complexité des système, compatible avec les technologies des circuits intégrés, spécifications du matériel peu exigeantes (bruit de phase, tolérance des composants), pas d'oscillateur local, pas de synchronisation sur une porteuse, l'utilisation de techniques simples comme CSMA peuvent améliorer encore le fonctionnement du système, les antennes utilisées ne sont pas critiques, résistance aux interférences et aux réflexions.

Un prototype de laboratoire 3-5 GHz basé sur des composants du commerce a été développé et démontré au CSEM. Les blocs principaux sont disponibles en Si-Ge.

Les coûts sont peu élevés en ce qui concerne l'émetteur en FM. Le récepteur réclame des moyens plus importants, mais un récepteur de conception simple est néanmoins possible [Gerriets 06].



Le CSEM annonce une consommation de l'ordre de 5 mA en émission et de 10 mA en réception à 3 V (on tend aujourd'hui vers le 1,5 V.) Le « **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** donne les différents contributeurs à la consommation globale des émetteurs et récepteurs.

Système	Sous-syst.	Bloc	Consommation (μA)
Emetteur	oscillateur sous-porteuse	DDS	100
		DAC	100
		passe-bas	200
	oscillateur RF	VCO RF (large-bande) ampli sortie (large-bande) LF ADC LF DAC	1500 1500 <10 100
Récepteur	front-end RF	VCO RF (large-bande)	2000
		Démodulateur FM large-bande	3000
		commutateur antenne	-
	traitement sous-porteuse	quadr. LO sous-porteuse	700
		filtre anti-aliasing	1000
		mélangeurs	200
		LPF	500
Commun	osc. 20 MHz	amplificateurs limiteur	50
		démodulateur FSK	10
		quartz oscillateur	80

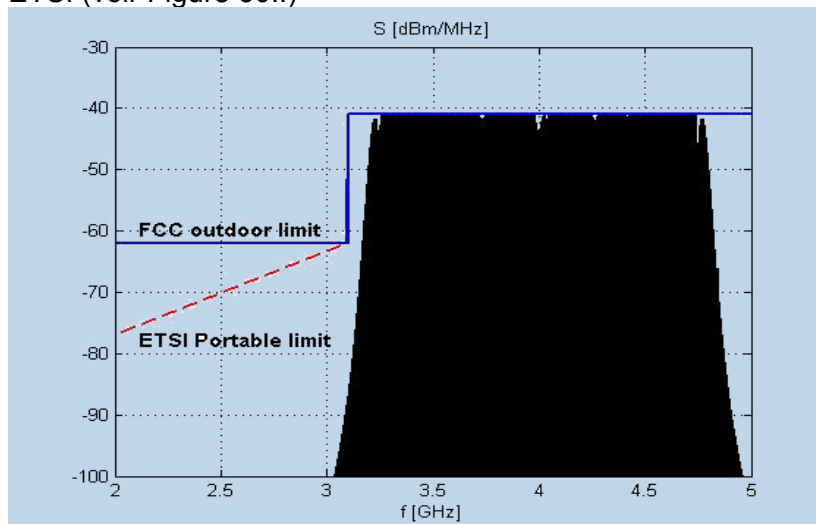
**Tableau 10 : consommation de la solution UWB-FM CSEM et ventilation**

Un signal FM peut supporter n'importe quel débit donné par l'Équation 1 (pour autant qu'un VCO correspondant puisse être trouvé) Elle est aussi indépendante de la modulation.

$$B_{RF} = 2(\beta + 1)f_m = 2(\Delta f + f_m)$$

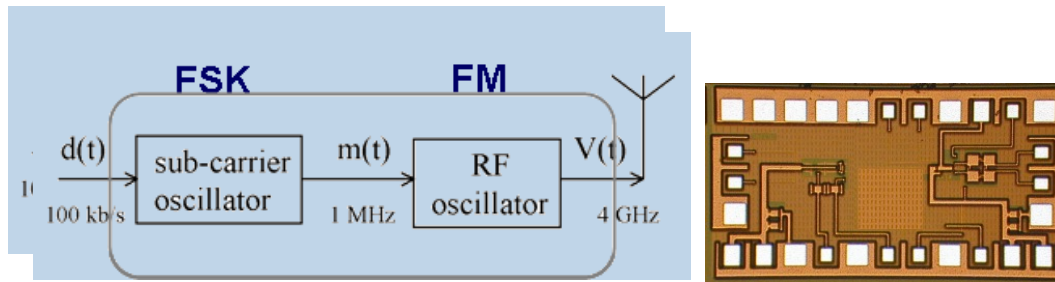
**Équation 1 : débit obtenu en FM-UWB**

La reprise spectrale est aussi très rapide ce qui est intéressant pour coller au mieux au gabarit ETSI (voir Figure 30..)



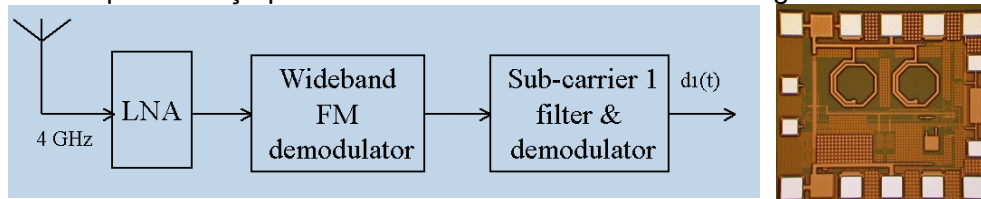
**Figure 30 : Signature FM-UWB et adéquation au gabarit FCC/ETSI**

L'émetteur conçu par le CSEM est schématisé dans la Figure 31.



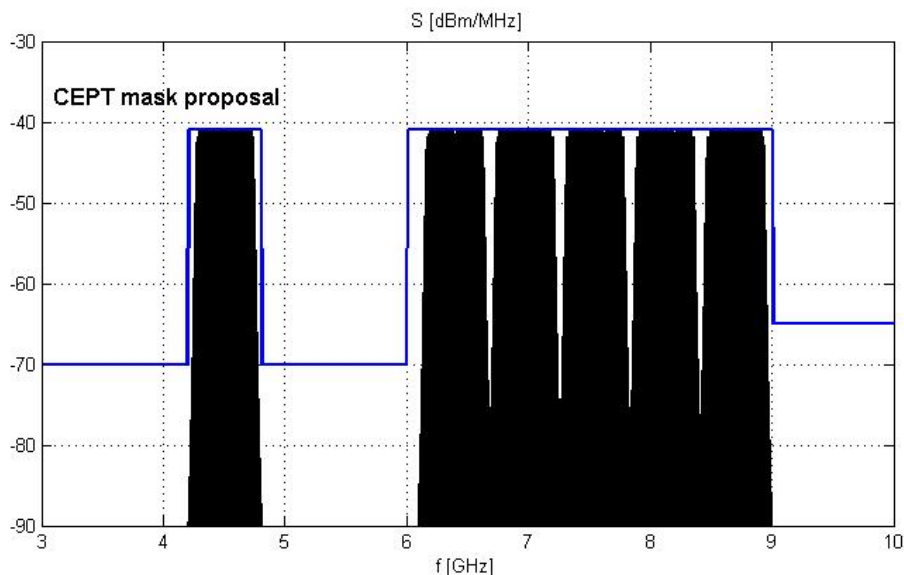
**Figure 31 : Schéma de l'émetteur FM-UWB du CSEM et réalisation**

Le récepteur conçu par le CSEM est schématisé dans la Figure 32.



**Figure 32 : Schéma du récepteur FM-UWB du CSEM et réalisation**

FM-UWB colle facilement au gabarit proposé par la CEPT, comme cela est indiqué dans la Figure 33.



**Figure 33 : adéquation de FM-UWB avec le gabarit proposé par la CEPT**

La résistance de FM-UWB est bonne dans les canaux CM1-CM4, BAN et PAN. Sa robustesse est bonne, par exemple face à WIMAX (SIR = -20 dB) ou face à MBOFDM (SIR = -15 dB), grâce au gain obtenu par traitement au niveau du récepteur, donné par l'Équation 2.

$$G_{PdB} = 10 \log_{10} \left( \frac{B_{RF}}{B_{SUB}} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{2 \Delta f_{RF}}{(\beta_{SUB} + 1) R} \right)$$

**Équation 2 : gain obtenu par le récepteur FM-UWB du CSEM**

Enfin, FM-UWB peut être utilisé en combinaison avec de nombreux mécanismes de contrôle d'accès au médium, comme IEEE 802.15.4, WiseMAC et autres algorithmes de type FDMA pour les réseaux personnels très basse consommations.

#### 6.4.10.1 UWB à impulsions, l'exemple d'IMEC

L'IMEC ( [www.imec.be](http://www.imec.be) ), institut de recherche belge, a développé une solution Ultra-Low-Power pour les réseaux de capteurs dédiés Body Area Network. Ce circuit est basé sur une

architecture Ultra-Wide-Band ( UWB ) à faible débit. Elle a été développée en technologie 0.18  $\mu\text{m}$ .

Le principe de l'UWB est de transmettre des trains d'impulsions à la place d'une fréquence continue ( CW ) ou modulé. L'information est incluse dans la position de l'impulsion et dans sa forme. Ceci permet d'atteindre des débits très élevés avec des solutions RF relativement simple et peu consommatrices.

Le bas débit pour l'UWB permet d'augmenter les portées, notamment par redondance de l'information et encodage, tout en conservant des consommations raisonnables.

IMEC a annoncé une consommation de 16 mA en réception à 1,8 V [MARLOW 06] pour un système UWB à impulsion.

IMEC annonce dans le cadre du projet IST MAGNET [Ryckaert 05] 50 pJ/pulse en moyenne, entre 16 et 5000 pulse par bits, ce qui correspond à quelques nJ/bit (2 mW en émission pour 40 MHz.)

#### 6.4.10.2 Consultance UWB : STANTEC

STANTEC (<http://www.stantec.fr/fr/home/index.php>) est une start-up née autour du pôle de compétence des universités de Grenoble, du CNRS et de France Télécom. « STANTEC a pour objectif de concevoir des systèmes de communications UWB © complètement intégrés, à faible consommation et à faible coût. Les applications envisagées concernent les communications nécessitant des distances inférieures à 100 m et des environnements du type intérieur (indoor), en mode "point à point" ou des réseaux locaux personnels sans fil (WPAN). »

STANTEC offre des services de consultance autour des technologies UWB. STANTEC est apparemment capable de concevoir des systèmes UWB sur mesure à partir d'un cahier des charges.

#### 6.4.10.3 Avantages et inconvénients

L'avantage principal de cette solution réside dans sa souplesse en terme de portée, car facilement adaptable en puissance et sensibilité.

Simplicité et basse consommation intrinsèque de l'émetteur. Relative complexité (par rapport à l'extrême simplicité des émetteurs, notamment en FM-UWB) et coût plus élevé du récepteur car il doit retrouver le signal sur une bande large. Petite taille en Si du transmetteur.

Les principaux inconvénients sont la standardisation encore en développement et la complexité de cette technologie naissante.

#### 6.4.10.4 Fournisseurs et produits

Pour le moment aucun circuit n'est disponible commercialement, mais le CSEM et l'IMEC prévoient de disposer de circuits expérimentaux en 2007. Le circuit de l'IMEC est disponible pour des pré-études. Pour plus d'information, il faudra passer par ces organismes.

Prix prévu du transmetteur (2<sup>ème</sup> génération) : quelques Euros.

IP : inconnus en 2006.

### 6.4.11 802.15.4 (y inclus LETIBEE)

#### 6.4.11.1 Description générale

Ce standard a été développé afin d'adresser les applications de réseaux de capteurs faible consommation. Les marchés visés sont la domotique, la télé relève de compteur, l'alarme et la sécurité pour le bâtiment et l'habitat individuel, et la gestion et le contrôle au sens large pour les applications industriels. Le domaine des jouets et des applications plus grand public est également visé.

L'un des points fort qui a été mis en avant pour son développement a été l'aspect intégration/consommation, qui permet en théorie d'adresser les marchés des capteurs en réseaux de grande autonomie.

Ce standard a donné lieu à un protocole connu sous le nom de Zigbee. Des circuits sont dès à présent disponibles pour adresser ce standard et ce protocole. Les principales caractéristiques sont :

Bandes de fréquence	2.4 GHz/868/915 MHz
Débit	250 kbps /20 kbps/40 kbps
Portée typique indoor	20 m ( 2.4 GHz ) /100 m (868/915 MHz)
Application/protocole	rapport cyclique faible à moyen, réseau de capteurs

**Tableau 11**

Parmi les paramètres qui permettent de comparer les différentes solutions, on peut citer :

Courant consommé	Power-Down / Idle / Tx / Rx
Intégration	Quantité / qualité des composants externes
Temps de verrouillage	Capacité à prendre peu de temps pour être opérationnel

**Tableau 12**

#### 6.4.11.2 Avantages et inconvénients

Les avantages essentiels de ce standard sont son aspect universel, qui permet de l'envisager pour une utilisation mondiale, la grande dynamique économique qu'il a entraînée et le fort potentiel de développement associé, ainsi que l'objectif de faible consommation qui est affiché.

Les principaux inconvénients sont comme toujours liés à ces avantages, à savoir son universalité qui en fait un standard non optimisé pour de nombreuses applications :

- La télé relève demande des autonomies beaucoup plus grandes ( > 10 ans )
- Les alarmes demandent des portées peu accessibles en 2.4 GHz ( > 500 m champ libre ).

Ce protocole Zigbee présente donc des avantages indéniables et des inconvénients majeurs pour certaines applications. Ce qu'on pourra retenir est qu'il établit un standard utile pour les réseaux industriels et qu'il permet, pour de très nombreuses applications, d'avancer dans la direction du « sans-fil » de façon stable et avec des produits largement diffusés et performants, avant d'évoluer vers des solutions plus adaptées à chaque utilisation.

#### 6.4.11.3 Fournisseurs et produits

Les composants décrits dans ce chapitre ont été sélectionnés pour l'intérêt et la pertinence de leurs performances techniques. Ils existent d'autres fournisseurs potentiels, proposant des solutions moins bien décrites mais semblant moins intéressantes.

##### 6.4.11.3.1 TI / Chipcon

Chipcon a développé plusieurs composants pour la bande de fréquence 2.4 GHz. Parmi ceux-ci, le CC2420 permet de réaliser une communication radio avec le protocole Zigbee. Le CC2430 reprend les mêmes caractéristiques techniques, tout en intégrant un µC 8 bits de type 8051.

Paramètres		Min	Typ	Max	Unit	Condition / Note
Bande de fréquence		2400		2483.5	MHz	Pas de 1 MHz
P <sub>OUT</sub>		-24	0	0	dBm	
Sensibilité Rx			-95	-90	dBm	PER = 1%
Tension d'alimentation		2.1	3.0	3.6	V	
Consommations	PDN complet		0.02	1	mA	
	Idle		426		mA	Oscillateur XTAL + Régulateur
	Rx mode		18.8		mA	
	Tx mode		17.4		mA	P <sub>OUT</sub> = 0 dBm

Tableau 13

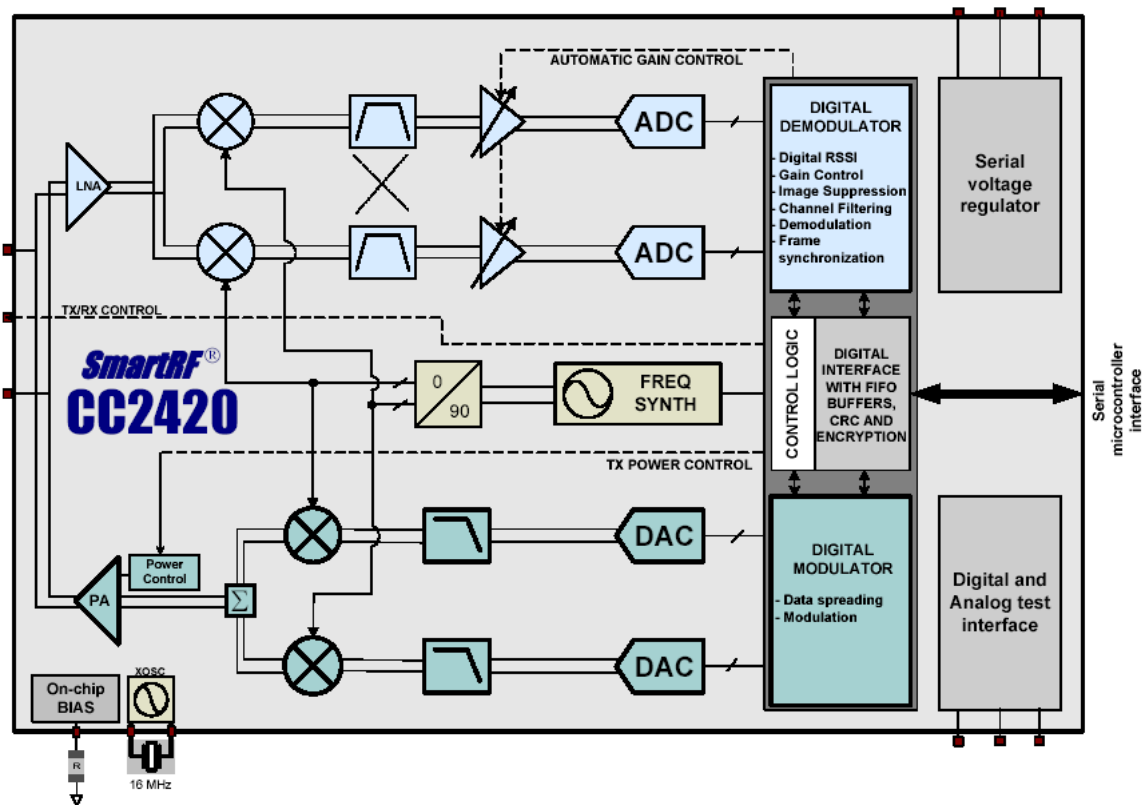


Figure 34 : CC2420

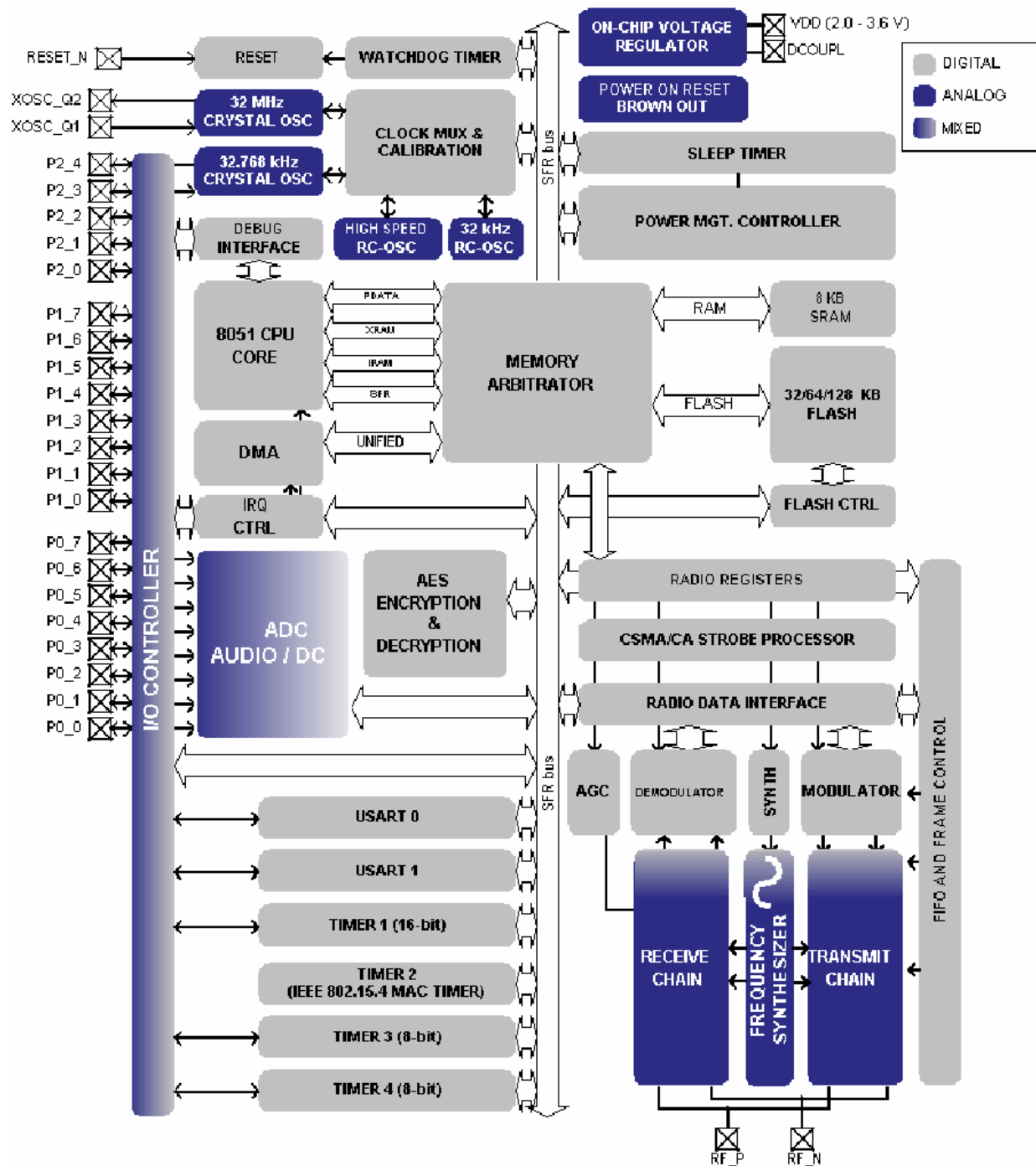


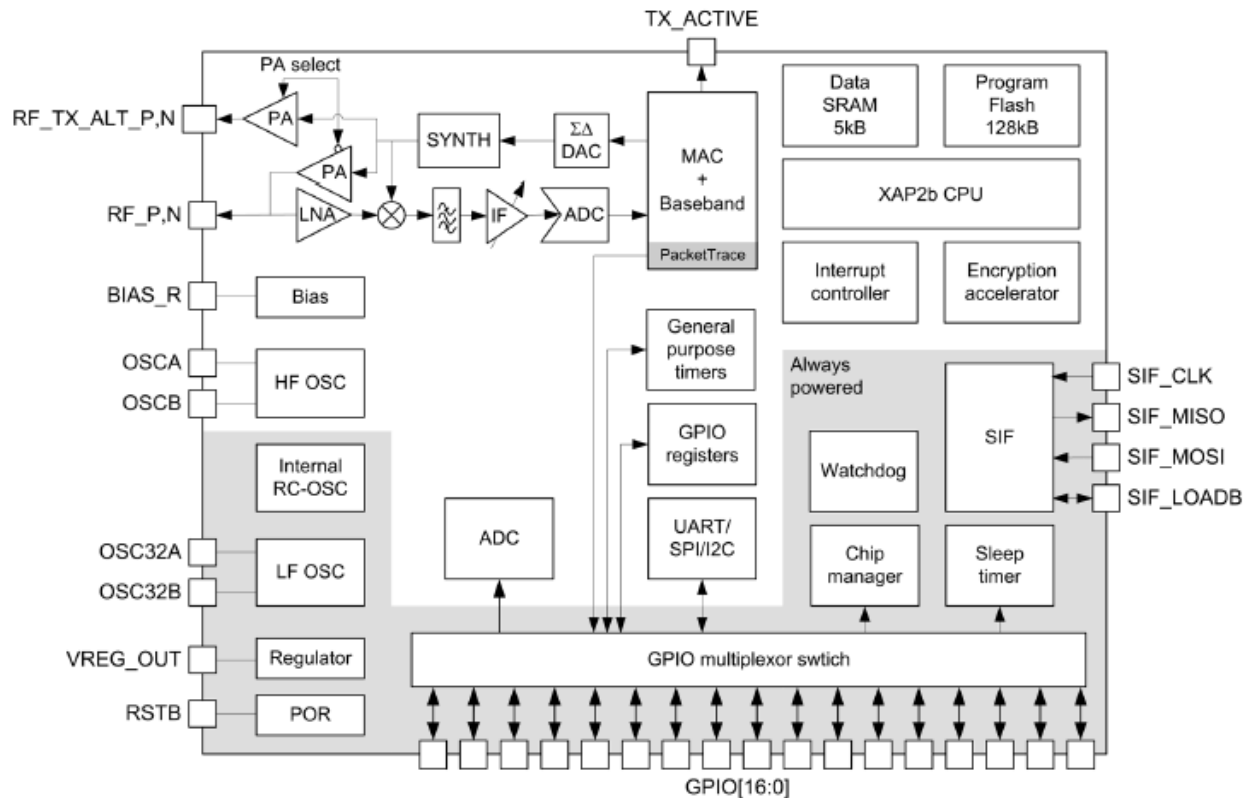
Figure 35 : Cœur µC

#### 6.4.11.3.2 Ember

Ember, société spécialisée dans le développement de stack logiciel, a tout d'abord travaillé avec Chipcon pour la réalisation d'une solution Zigbee. Ensuite, cette société a développé son propre front-end RF, EM250.

Paramètres		Min	Typ	Max	Unit	Condition / Note
Bande de fréquence		2400		2500	MHz	Pas de 1 MHz
P <sub>OUT</sub>		-32		5	dBm	
Sensibilité Rx			-98		dBm	PER = 1%
Tension d'alimentation		2.1		3.6	V	
Consommations	PDN complet		1		mA	
	Idle		1.5		mA	Oscillateur 32 kHz seul
	Rx mode		27		mA	
	Tx mode		29		mA	P <sub>OUT</sub> = +3 dBm

**Tableau 14**



**Figure 36 : EM250**

#### 6.4.11.3.3 CompXs / Integration CX1540

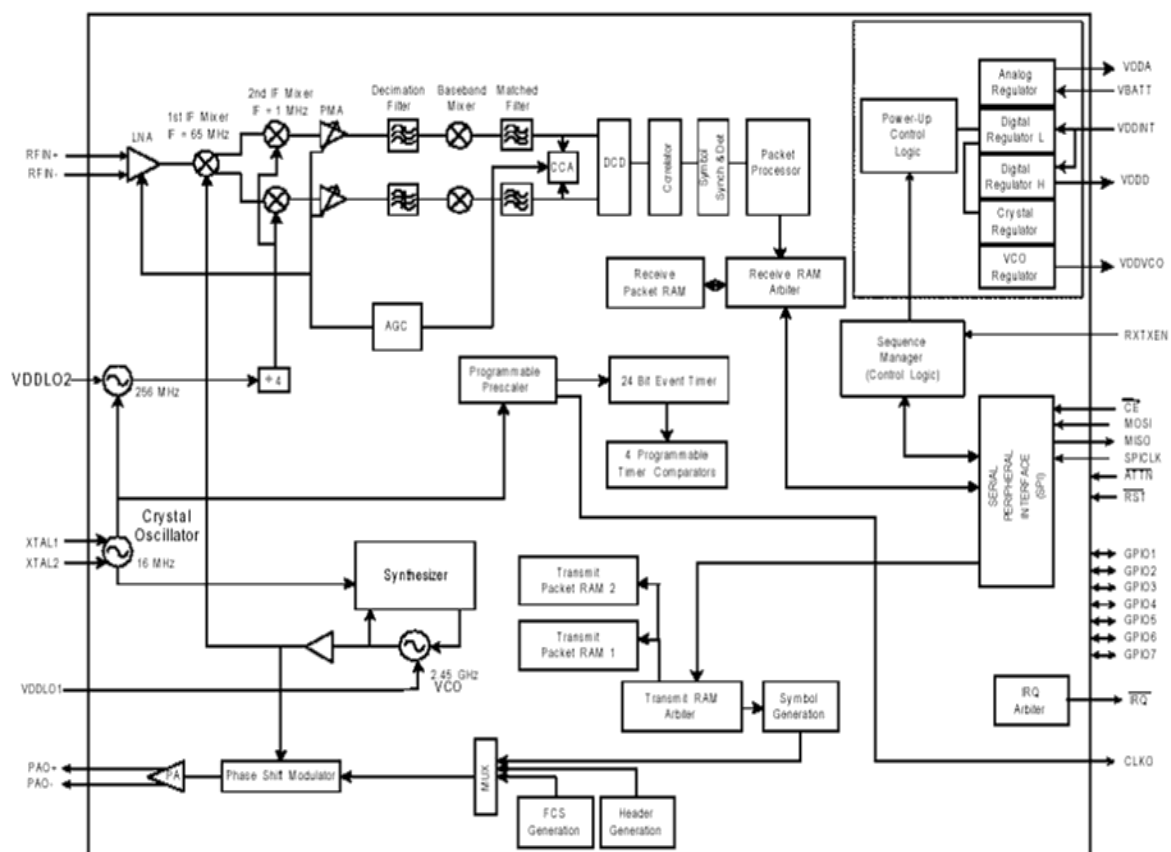
Ce composant a été conçu par la société CompXs, depuis acquise par Integration. Il intègre le front-end RF complet ainsi qu'un microprocesseur.





Paramètres		Min	Typ	Max	Unit	Condition / Note
Bande de fréquence		2400		2480	MHz	Pas de 1 MHz
P <sub>OUT</sub>		-27		+4	dBm	
Sensibilité Rx			-92		dBm	PER = 1%
Tension d'alimentation		2.0	2.7	3.4	V	
Consommations	PDN complet		0.2		mA	
	Idle		500		mA	Oscillateur XTAL
	Rx mode		37		mA	
	Tx mode		30		mA	P <sub>OUT</sub> = 0 dBm

**Tableau 16**



**Figure 38**

Le Leti a développé une solution compatible Zigbee intégrant un  $\mu\text{C}$ , un front-end RF et tout le traitement de bande de base. L'objectif de cette étude et réalisation est de démontrer la faisabilité d'une solution Zigbee très faible consommation. L'objectif retenu est de 5 mW max. sous 1.2 V de tension d'alimentation.

Le boîtier et les composants associés à ce circuit seront très comparables à ce que proposent les autres fournisseurs de solutions Zigbee. L'accent sera mis sur la consommation en mode actif et la qualité des performances associées.

Paramètres		Min	Typ	Max	Unit	Condition / Note
Bande de fréquence		2400		2480	MHz	Pas de 5 MHz
$P_{\text{OUT}}$			0		dBm	
Sensibilité Rx			-85		dBm	PER = 1%
Tension d'alimentation			1.2		V	
Consommations	PDN complet		TBD		mA	
	Idle		TBD		mA	Oscillateur XTAL
	Rx mode		3		mA	
	Tx mode		5		mA	$P_{\text{OUT}} = 0 \text{ dBm}$

**Tableau 17**

## 6.5 Liste des solutions intégrées

### 6.5.1 Perpetuum

#### 6.5.1.1 Description générale

La société Perpetuum ( [www.perpetuum.co.uk](http://www.perpetuum.co.uk) ) est une spin-out de l'université de Southampton en Angleterre. Leur objectif est de développer des solutions de récupération d'énergie, basées sur les oscillations mécaniques.

Le premier marché qu'elle semble viser pour cette récupération d'énergie est celui des réseaux de capteurs autonomes. Pour ceci, des développements sur base du standard 802.15.4 ont été commencés, à base de circuits TI / Chipcon.

Pour plus de détail, il conviendra de voir le paragraphe consacré à ce circuit.

Prix avancé : à discuter (cf. VNE, CSEM)

### 6.5.2 Coronis

#### 6.5.2.1 Description générale

La société Coronis Systems (<http://www.coronis.com/>) développe et commercialise des solutions radio faible consommation. Elle adresse principalement les marchés de « l'Automatic Meter Reading » (télé-relève de compteur), pour lequel des durées de vie de piles supérieures à 10 ans sont demandées.

Cette société a développé son propre protocole de communication ( Wavenis ) permettant d'optimiser la consommation. Ainsi, des réseaux relativement complexes peuvent être implémentés et adaptés par l'introduction de nouveaux modules, tout en conservant des

“overhead” inhérents aux réseaux raisonnables. Elle annonce avoir déjà installé 700 000 de ces modules.

Ces modules travaillent dans les bandes sub-GHz ( 433 – 868 - 915 MHz ) et profitent donc de la portée native importante de ces longueurs d’ondes.

#### 6.5.2.2 Avantages et inconvénients

Le principal avantage réside dans le protocole développé “Wavenis”. Celui-ci est propriétaire mais permet de développer des applications sans-fil en réseau rapidement et avec un développement minimum.

La consommation en mode actif, d’environ 17 mA, en fait un produit dans la moyenne des produits existants. Il compense ce défaut par un temps de recherche d’information très court ( ~ 500  $\mu$ s ), avant de se rendormir. Ainsi, pour les applications où les échanges d’information se produisent peu souvent, ce réveil très bref constitue un énorme avantage, permettant un courant moyen consommé faible. Ceci associé à un courant de fuite limité, ~ 2  $\mu$ A, permet de garantir des durées de vie longue, dans la gamme des 10 ans.

Le principal inconvénient, outre le protocole propriétaire, est que la consommation en mode actif en fait un produit moins intéressant pour une application où l’échange de données est fréquent. De plus, la tension minimale. d’alimentation est limitée à 3 V.

#### 6.5.2.3 Produits

Les produits proposés sont tous développées autour de la plate-forme “Wavenis” et porte différents nom commençant par “Wave....”.

Des cartes radio transceiver sont également disponibles, avec des débits de 4.8 kbit/s à 153 kbit/s, et des puissance d’émission de 25 mW à 500 mW.

### **6.5.3 EnOcean**

#### 6.5.3.1 Description générale

La société allemande EnOcean ( [www.enocean.com](http://www.enocean.com) ) est spécialisée dans la conception et la fabrication de module capteur / RF autonome. Elle a développé une technologie qui permet une autonomie totale d’un émetteur RF par l’utilisation de récupération d’énergie avant émission. Ce sont donc des produits sans piles.

La principale application est aujourd’hui les interrupteurs pour luminaire sans fil qui peuvent être facilement installés dans la maison. Ce type de produit s’adapte particulièrement bien à la restauration d’habitation, où le câblage peut être fastidieux voire impossible.

En parallèle, cette société a développé des modules radio / micro-contrôleur autonome fonctionnant avec piles ( consommation typique 30 mA ) qui permettent de créer des réseaux dans la maison. Le protocole utilisé est soit un protocole EnOcean faible consommation, qui permet de réaliser des réseaux dans la maison, par exemple, soit un protocole Zigbee donc compatible avec des solutions concurrentes.

#### 6.5.3.2 Avantages et inconvénients

Le principal intérêt des développements de cette société réside dans l’émetteur RF autonome. Il y a peu d’informations disponibles, mais le principe réside sur la génération de courant grâce à la pression exercée par un doigt par exemple. Un solénoïde de petite taille génère un courant qui est utilisé pour alimenter l’émetteur radio en modulation ASK dans la bande 868.3 MHz.

Cette solution pourrait être utilisée dans le cadre des projets adressés par Captaucom. L’émetteur RF choisi ou conçu par EnOcean doit permettre d’utiliser des récupérateurs d’énergie variés, tels qu’envisagés lors des réunions du projet ( thermique, piézo, mécanique, etc.)

Le principal inconvénient est que la solution est mono-directionnelle (émetteur seulement). La partie réception dans les applications décrites par EnOcean comprend toujours une source d’énergie importante (pile ou secteur). Ceci signifie que le récepteur peut être en écoute permanente, ce qui réduit considérablement la problématique de la « rencontre » de l’émetteur

et du récepteur. Le protocole EnOcean n'offre naturellement pas de capacité de communication à sauts multiples, ce qui réduit la portée du système à celle de l'émetteur (par nature assez faible). Il ne s'agit donc pas à proprement parler d'une solution pour des réseaux de capteurs sans fil.

#### 6.5.3.3 Produits

Les différents produits décrits sont :

TCM 110, 120, 130	émetteur-récepteur avec $\mu C$ , $I \approx 30$ mA
RCM110,112,120,122,130,142,152	RX, BW = 280 kHz , sensibilité = -95 dBm
PCM100	TX sans pile, piezo, 10 mW/120 kbps.
PCM200	TX sans pile, electro-dynamique, 10mW/120 kbps.

**Tableau 18 : consommation des produits proposés par enOcean**

### 6.5.4 WiseNet

#### 6.5.4.1 Description générale

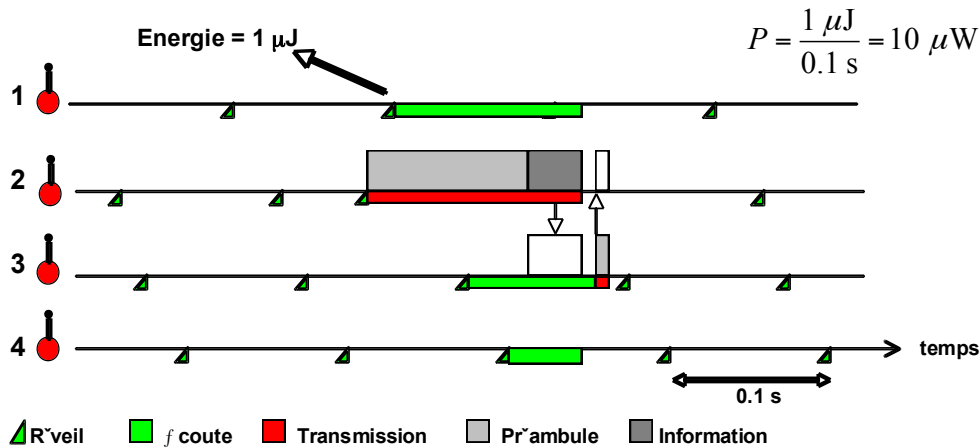
WiseNet [Enz 04], [Peiris 06] est une solution globale de réseau de capteurs sans fil développée au CSEM, intégrant la partie radio et un microprocesseur. Le but résidait dans une conception conjointe matériel-protocole en vue de minimiser la consommation dans les applications à faible trafic et ayant un cycle d'utilisation (duty-cycle) très faible.

Paramètres essentiels du circuit WiseNet (c.f. [Peiris 06]) :

Fréquence :	433MHz (ISM)	
Séparation des canaux :	600kHz	
Portée (approximative, dépend des antennes):	2km en vue directe, 10m en bâtiment	
Débit :	<100kbit/s	
Temps d'établissement de la radio :	550ms	
Temps de commutation de canal ou de retournement	200ms	
Modulation :	FSK, OOK	
Tension d'alimentation :	1.0V~1.6V (⇔ 1 pile alcaline)	
Courant endormi (oscillateur allumé):	3.5mA	
Consommation en réception :	2.3mA	
Sensibilité :	-108dBm@BER=10 <sup>-3</sup> et 25kbiit/s	
Consommation en émission :	28mA	Consommation en émission :  Puissance de sortie :
Puissance de sortie :	10.5dBm	
Bruit de phase :	-110dBc/Hz@600kHz	

**Tableau 19 : paramètres du circuit WiseNet**

Le système est optimisé en partant du principe que la quantité moyenne d'information à transmettre est extrêmement faible. Pour diminuer sa consommation, le récepteur n'est en service que de manière périodique, l'émetteur devant faire précéder son information d'un préambule suffisamment long pour être capté. Ces principes sont décrits dans [El-Hoiydi 04] et font partie du protocole de contrôle d'accès nommé WiseMAC.

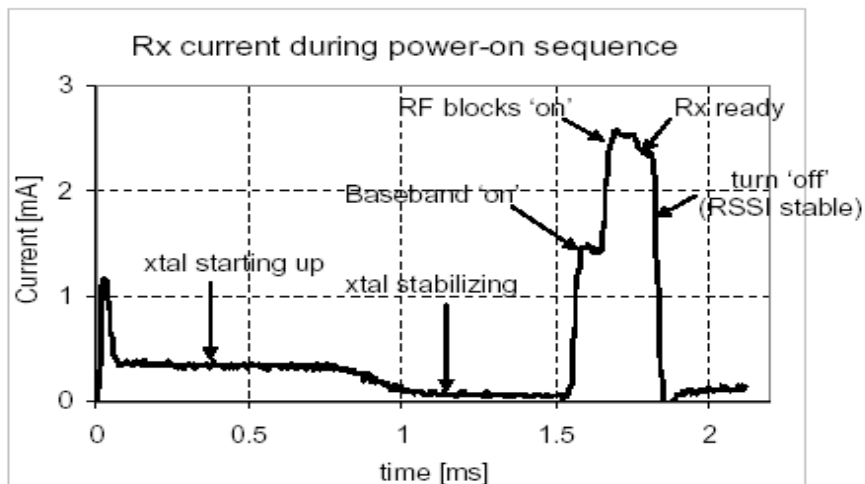


**Figure 39 : principe du protocole de contrôle d'accès au médium**

La durée entre chaque « écoute » du récepteur, augmentée de la durée de transmission de l'information, correspond au temps maximum de réaction. En première approximation, plus l'application peut se permettre un temps de réaction important, plus le rapport cyclique d'activité du récepteur, et donc sa consommation moyenne, est faible.

Avec la consommation du système endormi, le paramètre le plus important de la radio est alors la consommation d'énergie pour réveiller le récepteur, le système passant l'essentiel de sa consommation à sonder cycliquement un canal radiofréquence.

Pour optimiser ce réveil, les différents sous-blocs du récepteur sont alimentés séquentiellement, le plus tard possible avant leur utilisation. Un profil de consommation pour le sondage de canal radiofréquence est alors de la forme :



**Figure 40 : consommation en courant lors du réveil du circuit**

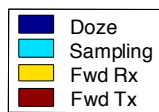
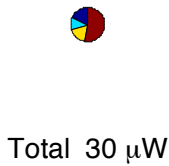
L'intégrale étant de très voisine de 1mAx1ms (soit 1mJ pour 1V d'alimentation). Pour un temps de réaction recherché de 100ms par exemple, cela fait une consommation moyenne de 10mA, de quoi obtenir quelques années d'autonomie sur une pile alcaline.

Les circuits récepteurs du commerce ont souvent cette intégrale au moins un ordre de grandeur plus importante, ce qui impacte beaucoup l'autonomie dans le même contexte applicatif.

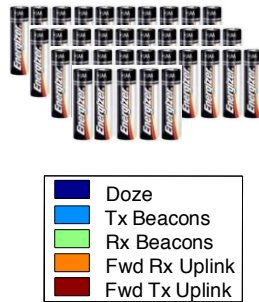
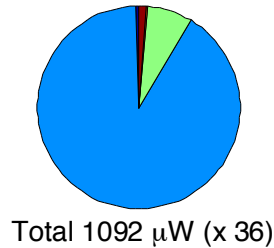
Le protocole WiseMAC possède d'autres mécanismes, de minimisation de la consommation côté émetteur et récepteur, de minimisation des collisions, de maximisation de la capacité de transmission avant saturation du canal et surtout, de structure de réseau complètement maillé à routage auto-organisé (c.f. [El-Hoiydi 04]).

Pour donner une comparaison du protocole WiseMAC avec Zigbee, le tout sur le circuit Wisenet, dans un cas particulier:

## WiseMAC



## IEEE 802.15.4 MAC, standard pour réseaux de capteurs



Contexte de comparaison: relayage d'un paquet de 32 octets toutes les 30s dans un réseau maillé, avec une période de réveil de 250ms (le x36 descend à x10 pour 1s de période).

### 6.5.4.2 Avantages et inconvénients

Outre sa faible consommation, les principaux avantages sont l'intégration (le seul composant actif externe est une EEPROM) et la flexibilité : la radio est largement paramétrable (bande, fréquence, débit, consommation...) et le micro-contrôleur interne permet, outre l'exécution de l'application elle-même, une adaptation du protocole.

Accessoirement, le circuit Wisenet est en fait un système sur une puce puisqu'il intègre un microcontrôleur 8bit CoolRISC C816L (<50mA/Mips) sa RAM mémoire et programme, des convertisseurs analogique numérique, des oscillateurs, un thermomètre, des élévateurs de tension et différents régulateurs et des PWM, UART, SPI, I2C.

Des inconvénients viennent de la spécialisation de la solution à l'application et de l'optimisation de la consommation quasiment sans compromis : pauvre rendement spectral de la modulation (FSK à fort indice de modulation pour ne pas nécessiter d'AFC), nombre de composants passifs RF important (adaptation RF et inductances du VCO, découplages), nécessité d'un filtre RF très sélectif (filtre à onde de surface) pour chaque bande.

Le principal inconvénient est la difficulté d'accès au circuit.

### 6.5.4.3 Fournisseurs et produits

Le circuit est le fruit d'une coopération avec un client qui reste propriétaire du silicium (ce qui n'est pas le cas du protocole.)

Pour les autres composants, aucun problème d'approvisionnement auprès de plusieurs sources.

## 6.5.5 Solutions RF intégrées

### 6.5.5.1 Description générale

Dans les bandes ISM, gammes de fréquences 433/868/915/2400 MHz, on trouve de nombreux fournisseurs qui offrent des solutions RF pertinentes. Les produits proposés sont en général très intégrés ( ~ 10 composants associés – capacités, résistances, inductances, quartz ... ) et les coûts relativement réduits : une solution RF complète bidirectionnelle hors µC revient à ~ 1.5 / 2 €.



Ces différentes solutions sont très proches et diffèrent essentiellement par le nombre de composants externes nécessaires, leur prix et certaines performances ( sensibilité, puissance ... ). Elles sont à envisager dans leur globalité, le choix de tel ou tel fournisseur étant ensuite guidé par des considérations d'optimisation. De prix, de consommation, de performances. En général, elles ne sont pas très faible consommation puisque rarement en dessous de 10 mA en mode actif. De plus, elles souffrent de temps de démarrage qui pèsent sur le protocole et entraînent des consommations moyennes assez importantes : de 20 à 50  $\mu$ A en fonction des protocoles.

#### 6.5.5.2 Avantages et inconvénients

Les avantages de ces solutions sont :

- Grande souplesse d'utilisation
- Optimisation des consommations
- Solutions proches qui relativisent leur caractère mono source.
- Intégration forte.

Les inconvénients sont :

- Développement de l'application propriétaire
- Restent des solutions consommatrices comparées au RFID ou à WiseNet / Letibee.

#### 6.5.5.3 Fournisseurs et produits

##### **6.5.5.3.1 ATMEL**

Atmel ( [www.atmel.com](http://www.atmel.com) ) propose une gamme d'émetteur/récepteur/transceiver adressant les bandes 433/868/915 MHz. Il s'agit de solutions en général très intégrées qui permettent des débits de 1 kbit/s à 100 kbit/s. En version 2.4 GHz, il est possible d'atteindre 1 Mbit/s.

Les références des produits disponibles sont :

- TX simples : T575x, synthétisés mono-canal
- RX simples : T574x, synthétisés mono-canal
- TRX : AT86RF211S, ATA542x, synthétisés, multi-canal.

Atmel propose également une gamme de  $\mu$ C particulièrement intéressante pour les réseaux de capteurs ( Tiny et AVR ). Ceci peut présenter l'intérêt d'optimiser les coûts d'approvisionnement en réalisant un "one-stop-shop" sur une solution complète.

Les avantages des ces produits sont :

- Grande souplesse d'utilisation : débit , performances, implémentation
- Solutions bien adaptées au durée de vie pile moyennes ( < 5ans )
- Prix réduits : de 0.5 € à 3 € la solution RF mono- et bidirectionnelle..
- Pas de protocole imposés.

Les inconvénients de ces produits sont :

- Solution propriétaire et mono source.
- Développement complet de l'application par l'utilisateur ( pas de standard associé ).
- Consommation en mode actif relativement élevée : de 10 mA à 40 mA.
- Solutions peu adaptées au durée de vie pile longues ( > 5ans ) et au capteur abandonné ( à cause du courant pic ).

##### **6.5.5.3.2 TI/Chipcon**

En rachetant la société Chipcon en 2006, TI ( [www.ti.com](http://www.ti.com) ) a élargi son portefeuille de solutions RF industriels et devient ainsi le n°1 dans ce domaine. Il propose une gamme très complète de produits, quasi-exclusivement transceivers. Les bandes de fréquence adressées sont 433/868/915 MHz ainsi que 2.4 GHz. Ces produits sont référencés :

- CC400, CC900, CC1000, CC1010, CC1050, CC1020, C1021, CC24xx ...

Comme Atmel, TI propose également un portefeuille de solution  $\mu$ C complet et proche de l'état de l'art pour les réseaux de capteurs industriels ( série MSP430 ).

Les principaux avantages de TI sont :

- Portefeuille complet de solution : fréquences, performances, coûts.
- Consommations raisonnables : de 15 à 20 mA.
- Solution très intégrée.
- Versions disponibles avec  $\mu$ C intégré on-chip ( 8051 ).
- Prix réduits : de 1 € à 3 € la solution RF bidirectionnelle.
- Pas de protocole imposé.

Les inconvénients sont :

- Solution propriétaire et mono source.
- Développement complet de l'application par l'utilisateur ( pas de standard associé ).
- Solutions peu adaptées au durée de vie pile longues ( > 7 ans ) et au capteur abandonné ( à cause du courant pic ).

#### **6.5.5.3.3 Integration Associates**

Cette société américaine ( [www.integration.com](http://www.integration.com) ) proposent des produits RF très intégrés, offrant un Bill-Of-Material minimale, donc optimisés en coût. Les bandes de fréquences adressées sont 433/868/915 MHz. Les références sont :

- Emetteur IA42xx : bonne puissance, consommation raisonnable
- Récepteur IA43xx : bonne sensibilité, consommation raisonnable
- Transceiver IA44xx : reprennent les caractéristiques des précédents dans un petit boîtier

#### **6.5.5.3.4 Semtech / Xemics**

Cette société suisse, racheté par une société américaine ( [www.semtech.com](http://www.semtech.com) ) propose un catalogue de produits RF intégrant ou pas un  $\mu$ C. Les bandes de fréquences adressées sont 433/868/915 MHz. Les références sont :

- XE120x : transceivers, très intégrés, faible consommation
- XE1283 : transceivers +  $\mu$ C , très intégrés, faible consommation

#### **6.5.5.3.5 Maxim**

Maxim ( [www.maxim-IC.com](http://www.maxim-IC.com) ) propose une gamme de produits RF assez peu intégrés comparés aux fournisseurs précédemment cités. Les bandes adressées sont 315/433/915/2400 MHz. Cependant, les performances sont et les consommations intéressantes. Les références des produits disponibles sont :

- MAX703x : transceiver 315/433 MHz assez performant notamment en consommation, mais utilisant des filtres céramiques externes.
- MAX242x : transceiver 915 MHz peu intégrés, avec une consommation assez forte.

#### **6.5.6 Wibree**

Très récemment, les sociétés CSR, Broadcom, Epson, Nokia et Nordic Semiconductor ont annoncé le développement d'un standard de communication sans fil baptisé Wibree ( [www.wibree.com](http://www.wibree.com) ), destiné à fournir des solutions très proches de Bluetooth, mais visant la très faible consommation (<http://www.pcmag.com/article2/0,1895,2023871,00.asp> évoque un dixième de la consommation de Bluetooth).

Il s'agit là d'un protocole de communication sans fil destiné à faire communiquer des stations déjà équipées de Bluetooth ( téléphone portable, PC, etc.) avec des "petits" objets de type montre ou issus du monde des réseaux de capteur.

Cette technologie de communication utilise la bande 2.4 GHz et offre un débit de l'ordre de 1 Mbits/s. Elle est considérée comme une version plus simple que Bluetooth du point de vue des protocoles, mais pouvant être intégrée sur la même puce que Bluetooth (puces « hybrides » utilisant la même radio). Le but annoncé est d'étendre les capacités d'échange d'information dans un réseau de type Body Area Network (BAN) en conservant des consommations très limitées (notamment pendant les périodes de veille) permettant l'utilisation de piles boutons – ce qui est aujourd'hui inconcevable avec Bluetooth. Un réseau pourra donc être composé d'une « centrale » de type téléphone portable contenant une puce Bluetooth compatible avec Wibree et des capteurs environnants équipés de Wibree.

Une autre caractéristique de Wibree est d'intercaler ses propres transmissions entre les émissions de Bluetooth, grâce à un ordonnancement original intégré au sein de la couche « data » link »

([http://searchmobilecomputing.techtarget.com/generic/0,295582,sid40\\_gci1224615,00.html](http://searchmobilecomputing.techtarget.com/generic/0,295582,sid40_gci1224615,00.html)).

Des capacités de cryptage sont également prévues.

Les spécifications de ce standard seront divulguées début 2007 et les premiers circuits sont attendus pour mi-2007. Entre les lignes, il est possible d'imaginer que le protocole sera beaucoup léger que celui de Bluetooth – temps d'accrochage au réseau, quantité d'informations échangées, mécanisme de saut de fréquence – et que les performances RF seront relâchées pour permettre une faible consommation et une utilisation de type BAN. La portée maximale visée est d'environ 10 m.

### 6.5.7 INSTEON

INSTEON est une solution non-propritaire, inventée par SmartLabs inc. (<http://www.smartlabsinc.com/>) et promue notamment par HomeSeer (<http://www.homeseer.com/company/releases/05-12-INSTEON.htm>.) Elle couvre les besoins en communication des applications domotiques. Le principe d'INSTEON repose sur l'utilisation de deux réseaux, l'un basé sur des liaisons sans fil, l'autre sur le réseau électrique. Le tout est compatible avec X10. La modulation est de type FSK, le débit de 12 kbit/s et la portée est de 50 m environ (<http://www.insteon.net/%5Cspecs.html>.)

Des détails sont disponibles sur chez Insteon (<http://www.insteon.net/pdf/insteondetails.pdf>). En particulier, cette solution fonctionne à 902-924 MHz, qui n'est pas autorisée en Europe (une adaptation à 868 MHz est probablement réalisable.)

### 6.5.8 Z-wave Alliance

#### 6.5.8.1 Description générale

L'alliance Z-Wave (<http://www.z-wavealliance.org/content/modules/Start/>) est un consortium ouvert qui regroupe une centaine de fabricants (dont Zensys, Intel, Danfoss, Monster Cable, Homeseer, Logitech, Panasonic, etc.) qui utilisent la technologie sans fil Z-Wave. Par exemple Zensys l'utilise dans des applications domotiques et d'éclairage extérieur. Cette technologie utilise des techniques classiques des réseaux de capteurs, comme les sauts multiples, le routage automatique avec optimisation des chemins. La couverture totale du réseau peut être grande, puisqu'elle peut être augmentée par l'adjonction de nœuds supplémentaires. Les transferts, effectués à 9,6 kbit/s, sont acquittés.

Six types de nœuds sont reconnus dans l'architecture Z-Wave : esclave, esclave routeur, contrôleur portable, contrôleur fixe, contrôleur de mise à jour fixe et outil d'installateur. La communication peut se faire en point à point, en multicast et en diffusion. Le nombre de nœuds atteignable lors d'un envoi multicast est 232.

#### 6.5.8.2 Fournisseurs et produits

Zensys propose une puce comportant toutes les fonctions du système de communication sans fil. Cette puce possède un contrôleur et une radio (couches physique, MAC et application)

## 6.6 Identification des véhicules : technologies RFID

### 6.6.1 Généralités

Les technologies RFID sont déjà utilisés dans de nombreux domaines comme celui des transports

Elle sont parmi les technologies les plus prometteuses concernant l'identification des véhicules

### 6.6.2 Quelques points clés de la technologie RFID

Un système RFID est caractérisé par les quelques points clés, fonctionnels ou technologiques qui suivent :

#### Système :

La technologie d'identification RFID fait intervenir deux composants électroniques principaux : le tag et le lecteur (ou interrogateur).

La technologie « Radio Frequency Identification » (RFID) est basé sur un principe de communication point à point asymétrique entre un « tag » (en général de faible taille et de faible coût) et un lecteur (en général de taille importante et de coût élevé.) A l'occasion de la rencontre des deux éléments, le lecteur peut demander au tag de transmettre les données qu'il contient, qui peuvent consister en un simple identifiant ou des données plus sophistiquées qui restent seulement lisibles, voire établir des échanges plus complexes pour assurer la sécurité du transfert de données ou pour écrire des données sur le tag. Dans certains cas, le lecteur peut aussi fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du tag, par rayonnement d'un champ magnétique capté par l'antenne du tag. Les échanges de données sont généralement bidirectionnels.

Dans la grande majorité des cas, l'interrogateur est le maître de la transaction. Il existe toutefois une catégorie de tags (TTF, Tag Talks First & TTO, Tag Talks Only) qui transmettent leur code d'identification dès leur entrée dans le champ électromagnétique et sans requête de la part de l'interrogateur. Par ailleurs, l'interrogateur est connecté par câbles ou par radio à un système informatique plus ou moins centralisé dans l'entreprise, voire à l'extérieur.

#### Electromagnétisme :

Pour des raisons de contraintes de coûts de fabrication et de maintenance, une étiquette classique ne possède pas de source d'énergie. Elle tire donc en général son alimentation en énergie du seul champ électromagnétique auquel elle est soumise. Ceci a un impact considérable sur les performances du système. En particulier, les réglementations d'émission radio font peser une contrainte technique très forte tant en terme de performances que d'interopérabilité mondiale. En effet, pour être performante en distance de lecture, la télé alimentation nécessite de se mettre aux limites des puissances d'émission autorisées. Cet aspect est la différence fondamentale entre les systèmes RFID, dits sans contact, et les transmissions radio sans fil.

#### Fréquences d'utilisation :

Pour des raisons historiques et de produits préexistants, différentes bandes de fréquences ont été retenues dans des zones fréquentielles libres de licences d'utilisation : <135 kHz (BF),

13,56MHz (HF), 433MHz (VHF), 850-960 MHz (UHF) et 2,45GHz (SHF). Le 5,8 GHz, retenu dans un premier temps, n'a pas été normalisé.

On peut regrouper les deux premières fréquences (BF & HF) du fait qu'à ces fréquences les distances de fonctionnement sont très inférieures au sixième de la longueur d'onde. C'est donc le champ proche et sa composante magnétique qui sont utilisés. Les antennes sont des bobines.

Pour les fréquences les plus hautes (VHF, UHF, SHF) c'est le champ lointain qui est utilisé. Les antennes sont plutôt de type filaire ou très proche des antennes radio classiques.

Le 433MHz correspond à une application particulière (conteneurs) dans laquelle les étiquettes sont actives pour obtenir des distances de lecture de plusieurs dizaines de mètres.

#### Couplage électromagnétique :

Les performances d'un système RFID dépendent essentiellement de la qualité du couplage entre l'antenne de l'interrogateur et celle de l'étiquette. Ce couplage est, soit magnétique lorsque l'on utilise des bobines comme antennes, donc à basses et hautes fréquences, soit électrique lorsque que l'on travaille à plus haute fréquence en mode propagatif. Un couplage capacitif a été développé par Motorola pour créer des antennes résistant à des conditions physiques sévères (chocs, pliage,...) mais cette approche ne semble pas pouvoir présenter des performances satisfaisantes. Notons qu'en UHF et SHF, les fabricants proposent différents types d'antennes afin de compenser des contraintes environnementales telles qu'objets métalliques, liquides, objets disposés en vrac.

#### Étiquettes passives/actives :

Une étiquette est dite passive si elle ne possède pas de source d'énergie à bord ou si elle se contente de répondre à une sollicitation extérieure. Elle est alimentée par le champ électromagnétique émis par l'interrogateur. Notons que certaines étiquettes sont dites actives, d'autres « assistées par batterie ». Si cette énergie est utilisée pour l'émission radio de la voie retour, on se retrouve dans le cas de communications radio numériques classiques.

Les tags RFID sont classés en fonction de leur capacité à lire et à écrire les données. Il existe 5 classes:

- CLASS 0 (READ ONLY) : les données sont écrites une seule fois en usine. Aucune modification n'est possible ultérieurement. Les données sont souvent de simples ID.
- CLASS 1 (WORM-Write Once Read Many) : le tag est fabriqué sans aucune donnée inscrite en usine. L'utilisateur n'a qu'une seule opportunité d'écriture.
- CLASS 2 (READ WRITE) : Les utilisateurs peuvent aussi bien lire et écrire les données. Ce type de tag est considéré comme un enregistreur de données dans lequel un ensemble complet de données peut être inscrit en mémoire.
- CLASS 3 (READ WRITE avec capteurs embarqués) : Ce type de tags peut enregistrer les paramètres comme la température, pression, mouvement, etc. Ce type de tags doit être actif ou semi-actif pour pouvoir enregistrer régulièrement ces paramètres en l'absence de lecteurs.
- CLASS 4 (READ WRITE avec transmetteurs intégrés) : ces tags peuvent communiquer entre eux sans la présence de lecteurs, contrairement aux tags semi-actifs.)

#### Identifiant unique :

Chaque étiquette doit contenir un identifiant unique stocké dans une mémoire non volatile. Il est écrit soit à la fabrication en usine, soit par l'utilisateur au moment de l'initialisation de son système. Par principe, cet identifiant ne doit pas être modifié. La mémoire de stockage est verrouillée en écriture, soit par construction, soit par configuration. Lors du verrouillage par construction, l'identifiant est gravé dans la mémoire au moment de la fabrication de la puce et la zone de stockage n'est plus accessible pour quelque modification que ce soit. Lors du verrouillage par configuration, c'est lors de l'initialisation du système que la zone mémoire est rendue inaccessible par verrouillage logiciel immédiatement après l'enregistrement de l'identifiant.

Un exemple d'identifiant inscrit par l'utilisateur est celui défini dans le standard EPC. Global

Il comporte:

- |   |         |
|---|---------|
| - Un en-tête  | 8 bits  |
| - Un identifiant de l'utilisateur qui code l'étiquette  | 28 bits |
| - Catégorie d'objet (sur lequel sera fixée l'étiquette) | 24 bits |
| - Un N° de série  | 36 bits |

La garantie de l'unicité de cet identifiant et sa protection par les verrouillages cités plus haut contre des attaques visant à le modifier contribuent à la sécurité globale du système

#### Mémoires non volatiles :

Différents types de mémoires non volatiles sont utilisés : programmée et figée à la fabrication (PROM), en écriture une seule fois et en lecture multiple (OTP ou WORM), en lecture et écriture. La mémoire non volatile à bord de l'étiquette a parfois une capacité supérieure à la taille du code d'identification. Cela permet de stocker des informations complémentaires sur l'objet au cours de son cycle de vie. Cette partie de la mémoire est en lecture et écriture (technologie EEPROM) et peut être verrouillée en écriture sur commande de l'interrogateur. A ce jour, cette partie n'est pas prise en compte par la standardisation.

#### Anticollision ou lecture multi étiquettes :

En général, plusieurs étiquettes peuvent se trouver simultanément dans le champ de l'interrogateur. Afin de pouvoir les lire toutes correctement, des protocoles adéquats, appelés anticollision, ont été développés. Ils reposent, soit sur une technique issue des technologies d'accès aux réseaux d'ordinateurs, soit sur des parcours d'arbres binaires de recherche. Dans le premier cas, le temps de lecture de toutes les étiquettes n'est pas connu d'avance. Les premiers protocoles ont des performances satisfaisantes et les développements sont en cours pour améliorer ces performances. C'est un des points clés des systèmes de lecture qui sera une caractéristique discriminante lors du choix des systèmes.

### Protection de la vie privée et fonction d'inhibition de l'étiquette :

En réaction à des retours d'utilisateurs inquiets d'être tracés ou surveillés en permanence par des systèmes RFID, une fonction d'inhibition de l'étiquette a été introduite dans le protocole de commande de l'interrogateur. Par exemple, des commandes de type « Kill » ou « Destroy » sont disponibles dans le jeu de commandes des systèmes RFID les plus récents. A la réception de ces commandes, la puce de l'étiquette s'inhibe immédiatement et définitivement, en général par destruction de la connexion entre l'antenne et la puce, de sorte qu'elle ne répond plus à aucune autre commande. Le code devient inaccessible au lecteur. L'utilisation de cette possibilité est du ressort de propriétaire de l'application. Elle peut par exemple être proposée au client au moment du paiement d'un achat dans un magasin. Notons que la suppression de l'accès au code d'identification peut avoir des conséquences négatives comme dans le cas de la maintenance d'appareils.

Par ailleurs, des concepts plus sophistiqués (blocker tag, étiquette « fédératrice », etc.) sont à l'étude. Le blocker tag, développé par RSA Security, est un leurre qui empêche la lecture de tags RFID spécifiés par des interrogateurs non autorisés en simulant une infinité d'étiquettes, ce qui « aveugle » l'interrogateur. L'étiquette fédératrice est une étiquette qui filtre les autorisations d'accès (en lecture et en lecture-écriture) à un ensemble prédéfini de tags RFID.

### Avantages et inconvénients

Les tags passifs nécessitent l'utilisation de lecteurs volumineux et coûteux. De plus la portée pratique est de moins de 10 cm en général. Les tags passifs peuvent néanmoins être activés par des lecteurs longue portée (par exemple les produits à 869 MHz, alimentés en 220 V, d'une portée de 3 m pour une consommation en courant de 0,5 A ou de 8 m pour une consommation de 2,5 A.)

Les tags actifs ont une durée de vie inférieure à 10 ans (plutôt de l'ordre de 3 ans), dépendant essentiellement de la fréquence et de la durée des périodes d'activité des tags. Les tags actifs sont plus sophistiqués et peuvent stocker plus d'information. Néanmoins, ils sont d'un prix plus élevé et sont plus volumineux

## **6.6.3 Etiquettes**

### 6.6.3.1 Le circuit électronique

Par principe, le circuit électronique d'une étiquette RFID possède trois fonctions :

- une interface Radio Fréquence pour récupérer l'énergie d'alimentation et échanger des messages et des données avec l'interrogateur ;
- un séquenceur numérique pour interpréter les commandes reçues de l'interrogateur et retourner l'information demandée ;
- une mémoire non volatile de stockage de l'identifiant unique sur 96 ou 128 bits.

La principale contrainte qui pèse sur ce circuit est celle du coût.

En première approximation, le coût d'un circuit est linéaire en fonction de la surface de la puce.

En deuxième approximation, il dépend du nombre d'étapes technologiques de fabrication.

Notons qu'un circuit plus petit devient plus cher à manipuler, la perte liée à la surface sciée devenant relativement plus importante et le temps de sciage augmentant d'autant.

On estime aujourd'hui que l'asymptote du coût de revient minimal d'une puce à base de silicium sera de 0,05 €.



Le schéma 2 présente les différentes fonctions électroniques intégrées dans la puce de l'étiquette RFID:

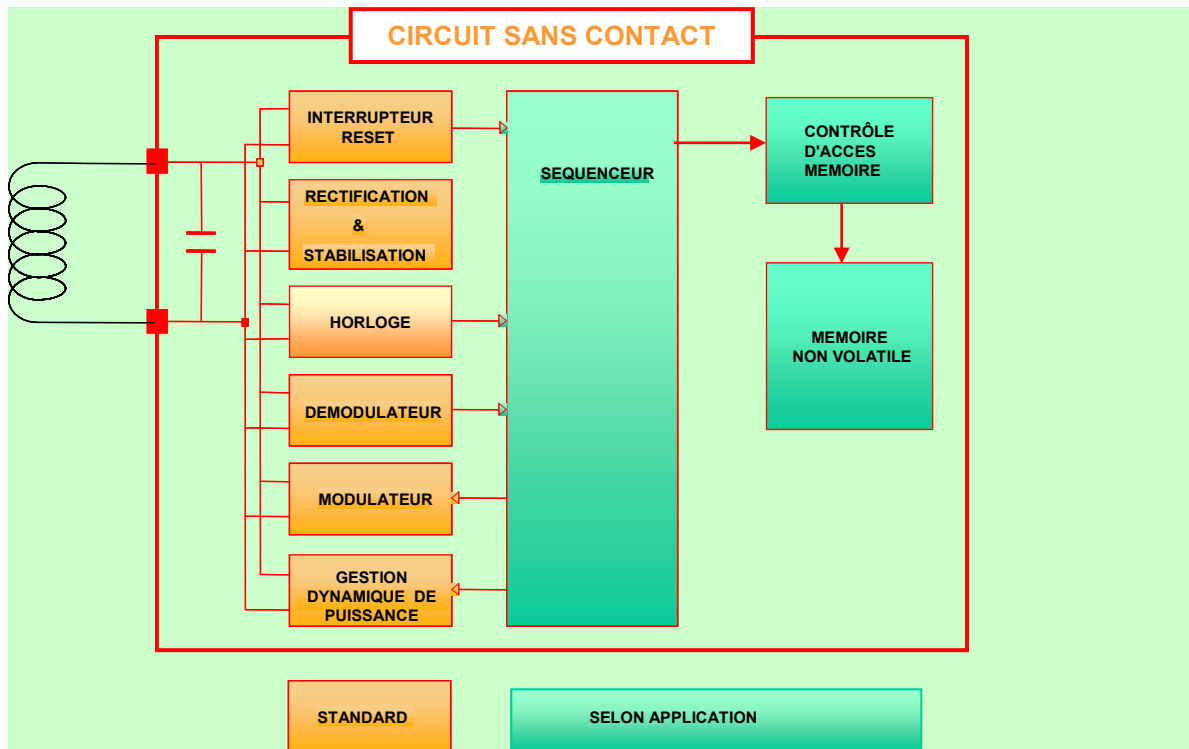


Schéma 2 : Fonctions électroniques de la puce RFID

#### 6.6.3.2 Filières électroniques

L'arrivée de technologies micro électroniques « faible consommation » de type CMOS, a permis la réalisation de circuits intégrés mixte Radio Fréquence et numérique. Il a rendu possible la télé alimentation de microcircuits très simples tels que ceux nécessaires aux tags d'identification électroniques (RFID). La possibilité de les produire en grande quantité à bas prix (quelques centimes d'euro) et leur faible taille ( $1\text{mm}^2$ ), les rendent potentiellement attractifs sur le plan économique.

Pour des raisons de coût, de disponibilité de bloc mémoire non volatile EEPROM et de consommation statique, les filières utilisées ne sont pas les plus récentes. Il y a généralement une à deux générations de retard par rapport aux derniers modèles de circuits utilisés dans les appareils électroniques les plus récents (Ordinateurs, téléphones mobiles,...).

#### 6.6.3.3 L'antenne

Selon la fréquence porteuse, deux types d'antennes sont principalement utilisés :

- les antennes de type bobine pour les basses (BF) et hautes fréquences (HF) ;
- les antennes de type filaire, voire patch pour les hautes fréquences (UHF et SHF).

En BF, compte tenu de la faible fréquence, on a besoin d'une bobine ayant de nombreuses spires (quelques centaines) et c'est donc une technologie relativement chère. Pour certaines applications, un solénoïde à noyau de ferrite est employé pour améliorer entre autres, les performances de propagation à travers des matériaux conducteurs (métaux).

La HF nécessite de l'ordre de cent fois moins de tours et on peut ainsi utiliser des antennes de quelques spires (moins d'une dizaine, parfois une seule) que l'on peut sérigraphier sur un support plan rectangulaire et éventuellement souple. Dans le cas de communications interrogateur/étiquette de l'ordre de quelques millimètres, on peut intégrer l'antenne sur la puce. Ces quelques spires de conducteurs qui entourent la partie active de la puce, réalisées au niveau des couches métal du procédé micro électronique, sont communément appelées « coil on chip ».

Les plus hautes fréquences (VHF, UHF, SHF) utilisent des antennes filaires de type « fouet ». Rappelons que la longueur d'onde est d'environ 33 cm en UHF et d'environ 12 cm en SHF. On utilise aussi des antennes patch, à fente ou en ligne brisée afin de compenser les pertes dues à un environnement difficile.

#### 6.6.3.4 Le packaging

En général, la puce est connectée à l'antenne extérieure à l'aide de deux plots. Le tout est souvent monté sur un premier support en général souple appelé inlay ou inlet. Selon l'utilisation, cet inlay est ensuite intégré dans un support plastique ou sur un support papier.

On note cependant des packagings spécifiques à certaines applications comme les gélules en verre pour le tatouage du bétail ou la forme jeton utilisée en particulier pour les applications de suivi des articles textiles.

Le schéma 3 montre très synthétiquement les trois éléments constitutifs d'une étiquette RFID ainsi que les deux types d'opérations à réaliser pour l'assemblage.

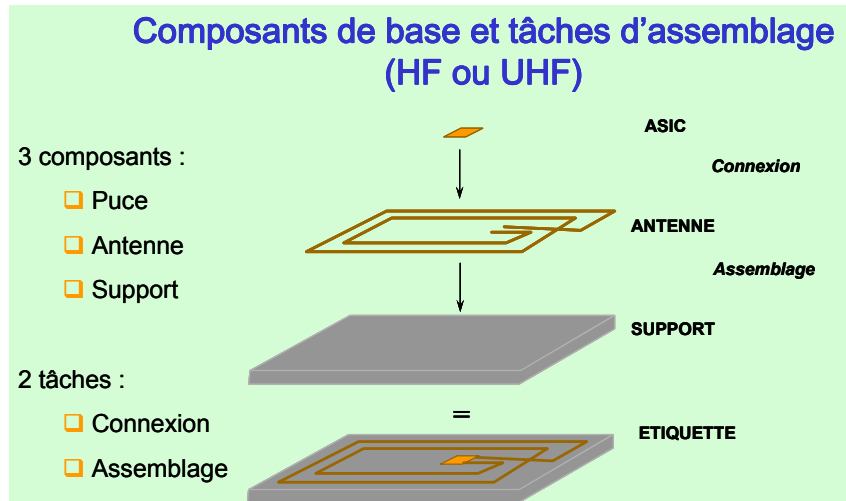


Schéma 3 : éléments constitutifs du tag

#### 6.6.3.5 Eléments de coûts

Sur les applications actuelles, on a une idée assez précise de la répartition des coûts entre les différentes composantes d'une étiquette. Si le coût de la puce est fonction de la surface de silicium utilisée, les autres coûts – antenne, liaison puce-antenne, packaging – sont davantage fonction des technologies utilisées et des applications envisagées.

A titre d'exemple, une antenne de quelques spires découpée dans une plaque de cuivre, aura un coût considérablement plus élevé qu'une antenne de même taille sérigraphiée avec une encre conductrice.

Aujourd'hui on constate que les coûts se répartissent plus ou moins de la façon suivante :

- 25% pour la puce de silicium
- 35% pour l'inlay qui comprend la puce, l'antenne et leur connexion.
- 40% pour le support et le packaging (plastique, carton, papier, ...) de l'étiquette.

En première approximation, le coût de la puce dépend de sa surface puis, en deuxième

approximation du nombre de niveaux technologiques. Une puce trop petite diminue le

rendement surfacique du wafer et coûte cher à manipuler. Notons que le coût des puces

bénéficie nettement des techniques de « fabrication collective », ce qui est moins vrai pour les autres postes de coût de l'étiquette.

On peut citer différentes techniques de connexion antenne-puce : wire bonding, flip-chip, colle conductrice. Celles qui nécessitent de la manipulation de type « pick and place » sont lentes et

donc potentiellement onéreuses. Des technologies innovantes du type « Fluidic Self Assembly » développée par Alien Technologies ont pour objectif de réduire le coût de manipulation des puces. Hitachi avec son  $\mu$ -chip dont les deux faces servent de plots de connexion, propose une solution alternative. Ces technologies sont sorties des laboratoires de développement pour des premiers essais industriels

En ce qui concerne l'antenne, les techniques d'impression par encres conductrices sont moins coûteuses mais les antennes métal (cuivre, aluminium,...) présentent des performances meilleures.

Notons que les procédés de fabrication, plus que les matériaux utilisés, représentent le point clé qui permettra une baisse des coûts de fabrication. A moins qu'une autre technologie telle que l'électronique organique, une fois mise au point, ne l'emporte grâce à la possibilité de « fabrication collective » à grande échelle issue des techniques d'impression.

Il est raisonnable d'envisager pour les étiquettes RFID une évolution du couple coûts/performances analogue à celle des mémoires des ordinateurs. On devrait assister à une convergence des tailles des puces et des technologies qui conduiront à imposer quelques standards de fait peu onéreux, voire à terme bon marché, alors que les étiquettes "hors standards" resteront coûteuses.

Le prix objectif visé par, exemple par le standard EPC Classe 1, est de 0,05 € (5 centimes d'euro). Aujourd'hui, cet objectif est très ambitieux. Certains fabricants proposent actuellement des inlays minces sur substrats polymères aux environs de 0,10 € (10 centimes d'euro) par grandes quantités. Cela paraît très proche des prix de revient, si ce n'est en deçà. De façon générale, les réductions de coût sont à faire au niveau de l'assemblage en favorisant les procédés de fabrication collective. Le prix plancher de 5 centimes reste cependant un formidable défi compte tenu des technologies actuellement employées. Notons aussi que le circuit intégré fabriqué déjà par des procédés éminemment collectifs n'a que peu de marge de réduction.

Un autre élément à prendre en compte dans le coût des étiquettes est l'impact des brevets. Si ces derniers sont bien identifiés – leur liste est annexée à chacune des publications ISO – l'évolution des coûts de redevance de ces brevets est actuellement difficile à appréhender.

#### **6.6.4 Interrogeurs**

##### **6.6.4.1 Electronique**

La partie électronique des interrogeurs est généralement réalisée en composants discrets. On commence à voir apparaître des composants intégrés qui regroupent une partie plus ou moins importante des discrets. Même dans les cas les plus intégrés, il y a toujours besoin de composants externes, en particulier passifs.

Les interrogeurs se présentent généralement sous la forme d'un boîtier électronique que l'on relie à l'antenne externe, mais aussi au système informatique par liaison filaire ou radio.

Certains interrogeurs sont portables et autonomes et se présentent sous la forme de « douchette ». En cas de lecture proche, l'antenne est interne et intégrée sur le circuit imprimé de l'électronique de l'interrogeur.

##### **6.6.4.2 Antennes externes et portiques**

On trouve toutes les formes d'antennes externes. Elles sont en général reliées par un câble de 50 ohms à l'électronique du lecteur. Les lecteurs bien conçus ont des performances indépendantes de la longueur de ce câble.

Des assemblages d'antennes, généralement appelés « portiques », permettent la lecture volumétrique (étiquettes réparties dans un grand volume). Elles sont alimentées par plusieurs voies gérées par l'électronique de l'interrogeur.

Certains systèmes UHF ou SHF utilisent deux antenne distinctes en émission et en réception afin d'éviter l'éblouissement du récepteur dû à une très forte puissance d'émission.

### 6.6.5 Télécommunications

Dans la majorité des applications actuelles, l'un des deux éléments, en l'occurrence le tag est passif, et ne possède donc pas d'énergie propre. Cette caractéristique induit plusieurs particularités:

- Le champ électromagnétique émis par l'interrogateur doit aussi assurer la fonction de télé alimentation.
- Le tag ne rayonne pas de puissance électromagnétique dans l'environnement.
- Il doit donc, pour être « vu » de l'interrogateur, modifier l'énergie qu'il absorbe ou qu'il renvoie (modulation de charge en HF et rétro diffusion en UHF).
- Au premier ordre, c'est donc uniquement la puissance émise par l'interrogateur que l'on doit prendre en compte au niveau des autorisations de puissance d'émission.
- Du fait de la dissymétrie d'alimentation, les fonctions d'émission et de réception du tag doivent être peu gourmandes en consommation pour assurer une bonne performance en distance de fonctionnement et simples en implémentation pour respecter des contraintes de coût.
- Le tag étant la plupart du temps en déplacement relatif par rapport à l'interrogateur, il doit aussi gérer des variations d'amplitude du champ électromagnétique qui peuvent être très importantes en BF.
- L'antenne de l'interrogateur doit avoir une dimension suffisante pour ne pas perdre le contact pendant toute l'opération de lecture-écriture (analogie avec les cartes sans contact)

#### 6.6.5.1 Le champ électromagnétique

Le champ électromagnétique, comme on vient de le voir, est une composante essentielle d'un système d'étiquettes RFID. Généralement, il est constitué essentiellement d'une fréquence pure modulée plus ou moins faiblement en phase ou en amplitude. C'est cette fréquence porteuse qui, une fois redressée à bord de la puce, assure son alimentation.

Ce champ électromagnétique peut subir des déformations, des atténuations voire des annulations locales en fonction de la nature des matériaux qu'il rencontre. La conductivité des matériaux est un paramètre potentiellement très perturbant. En cas de matériaux réfléchissant, à très hautes fréquences (UHF et SHF) et compte tenu des distances de fonctionnement qui peuvent représenter plusieurs fois la longueur d'onde, on peut avoir des phénomènes de trajets multiples avec des zones d'annulation locale du champ. (Swiss Cheese Effect)

Rappelons que c'est la composante magnétique du champ qui est utilisée en basse fréquence et en haute fréquence, et la composante électrique à très haute fréquence, UHF et SHF. Les conséquences pratiques sont une très grande différence de sensibilité à l'influence de l'environnement électromagnétique

### 6.6.5.2 L'interface air

Les normes actuellement disponibles (ISO/IEC18000-x) définissent l'interface air, c'est-à-dire le protocole de communication entre interrogateur et étiquette tant du point de vue des commandes que des échanges de données.

Le tableau ci-après montre les caractéristiques principales des techniques de transmissions numériques utilisées pour les cinq fréquences des normes ISO 18000-X.

ISO		Forward link				Return link			
		Carrier freq.	Modulation	Coding	Data rate	subcarrier freq.	Modulation	Coding	Data rate
18000-2	Type A FDX	125 kHz	ASK 100%	PIE	5.1 kbps		LSK	Man. Or Dual	4 or 2 kbps
	Type B HDX	134 kHz	ASK 100%	PIE	1.3 or 2.3 kbps	124.2 & 134.2 kHz	FM	NRZ	8 kbps
18000-3	Mode 1	13.56 MHz	ASK 10% 100%	PPM 1/4 or 1/2	26.5 or 1.65 kbps	Low 423 kHz	LSK	Manchester	6.62 or 26.48 kbps
						Fast 423-484 kHz	LSK	Manchester	6.67 or 26.69 kbps
	Mode 2	13.56 MHz	PJM	MFM	473.75 kbps	8 sub carriers	LSK	MFM	106 kbps
18000-4	Mode 1	2.45GHz	ASK 99%	Manchester	40 kbps		Backscatter	FM0	40 kbps
	Mode 2	2.45 GHz	GMSK		384 kbps	384 kHz	DBPSK	Manchester	384 kbps
18000-6	Type A	860-930 MHz	ASK 30%	PIE	33 kbps		Backscatter	FM0	40 kbps
	Type B	860-930 MHz	ASK 11-99%	Manchester	10-40 kbps		Backscatter	FM0	40 kbps
	Type C	860-960 MHz	ASK 90%	PIE	27-128 kbps	40-640 kHz	ASK	FM0	40-640 kbps
							PSK	Miller	5-320 kbps
18000-7		433.92 MHz	FSK	Manchester	27.7 kbps		FSK	Manchester	27.7 kbps

Une autre série de normes complémentaires (actuellement sous forme de « Technical Report » - ISO/IEC18047-x) – explicite les conditions de vérification de conformité des produits aux normes de base ISO/IEC18000-x.

Enfin une norme spécifique - ISO/IEC18046-1, 2, 3 explicite les conditions de tests visant à vérifier les performances. Le « Technical Report » 18046 va être prochainement transformé en norme internationale (IS).

### 6.6.5.3 Spectre disponible et réglementation des émissions radio

Pour des raisons de performances des systèmes RFID, en particulier en ce qui concerne les distances de lecture, les lecteurs sont conçus et configurés pour émettre en limite des puissances de rayonnement électromagnétique autorisées. Dans certaines bandes de fréquences et en particulier en UHF (860 à 950 Mhz), ces limites varient significativement d'un pays à l'autre.

BF	HF	UHF	SHF (micro ondes)
----	----	-----	-------------------



	Basse fréquence-	Haute fréquence-	Ultra haute fréquence-	Super haute fréquence, ou « micro ondes »
Région 1 Europe et Afrique	< 135 kHz	13,56 MHz	865,0 - 868,0 MHz	2,446 – 2,454 GHz
Région 2 Amérique du Nord et du Sud	< 135 kHz	13,56 MHz	902 - 928 MHz	2,4 – 2,4835 GHz
Région 3 Asie et Océanie	< 135 kHz	13,56 MHz	En cours	2,427 - 2,47 GHz

Tableau 5 : bandes fréquence retenues

La situation réelle est un peu plus compliquée pour la bande UHF (Japon, Inde, Chine, en particulier, chacun a ou aura sa réglementation)

A titre d'exemple, le tableau ci-dessous présente pour quelques pays de différentes zones la complexité de la situation pour l'UHF.

Pays	Utilisation autorisée	Bande RFID	Situation actuelle	Puissance Max	Normes	Protocole
<b>USA</b>	oui sans licence, avec restriction	902-928 MHz	Approuvé	4 W EIRP	FCC Part 15 Sect 247 (canaux de 500 kHz définition de 20 dB)	FHSS
<b>Europe CEPT/ETSI</b>	oui + réglementations nationales	865.6 867.6 Mhz	Approuvé	2 W ERP	EN 302 208	LBT
<b>CANADA</b>	oui, sans licence	902-928 MHz	Approuvé	1 W EIRP		FHSS
<b>CHINE</b>		917-922 MHz	Bande provisoire, avec licence, réglementation en cours d'étude	2 W ERP		
<b>COREE du SUD</b>		908,5-910 MHz 910-914 MHz	Approuvé	4 W EIRP 4 W EIRP		LBT FHSS
<b>HONG-KONG</b>	Telecommunications apparatus	865,6-867,6 MHz 920-925 MHz	Approuvé (modif à Telecom Order)	2W EIRP 4W EIRP	ETSI EN 302 208 pour bande 2W	FHSS pour bande 4 W
<b>JAPON</b>	Cellulaire, RFID	952-954 MHz	Rapport remis au ministère, études à poursuivre	4 W EIRP	ND	à définir
<b>TAIWAN</b>		922-928 MHz	Approuvé	1 W ERP (indoor) 0,5 W ERP (outdoor)		FHSS FHSS

### 6.6.6 Technologies émergentes

Plusieurs technologies émergentes vont affecter à plus ou moins long terme les procédés de fabrication et les performances des étiquettes RFID. On peut les regrouper en deux grandes catégories :

- Evolution des technologies traditionnelles à base de puces Silicium (mémoires non volatiles, micro batteries, micro capteurs) SOI (faible consommation)
  - Nouveaux procédés de fabrication de circuits électroniques (électronique polymère)
- Plus une catégorie « divers » : SAW (Surface Acoustic Wave)

#### 6.6.6.1 Mémoires non volatiles

Par construction, la mémoire non volatile est un bloc électronique important de la RFID puisque c'est lui qui stocke l'identifiant.

Leurs principales limitations actuelles sont : les temps d'écriture trop longs (quelques ms pour une EEPROM) et les tensions de programmation non directement compatibles avec la contrainte de télé alimentation (1 à 2 V), ce qui nécessite un élévateur de tension.

Différentes technologies sont actuellement développées avec un transistor et un matériau de mémorisation comme élément de base: FeRAM, MRAM, PC-RAM.

Une technologie différente à base de MEMS (Micro systèmes électromécaniques) est aussi proposée avec ses avantages et inconvénients potentiels : insensibilité aux rayonnements EM, grosse taille du point mémoire.

#### 6.6.6.2 Technologie faible consommation (SOI)

De nouvelles technologies microélectroniques développées ces vingt dernières années peuvent être pertinentes pour la fabrication de puces RFID. C'est le cas de la technologie (SOI-Silicium sur isolant) qui possède par construction un substrat de plus haute résistivité que le silicium bulk classique. Cela diminue favorablement les interférences entre la partie RF et la partie numériques des circuits.

Cette caractéristique permet aussi de réduire les courants de fuites et les capacités de couplage transistors/substrat ce qui à pour effet de diminuer la consommation statique et la consommation dynamique des circuits. Enfin, elle autorise une vitesse de fonctionnement plus

importante. Cette plus forte résistivité évite l'emploi de caissons autour des transistors ce qui a pour effet d'augmenter la densité d'intégration.

Cette technologie est beaucoup utilisée à présent par AMD pour réaliser ses processeurs 32 et 64 bits de la famille Athlon afin de diminuer la puissance dissipée et permettre des vitesses plus rapides. Elle est aussi utilisée par l'industrie horlogère pour réaliser des montres électroniques à plus grande autonomie. Elle peut apparaître pertinente en terme de consommation et d'isolation des parties RF et numérique d'une puce RFID. Notons cependant que le coût du wafer SOI est plus cher que celui du silicium classique (environ 10%). La puce  $\mu$ -chip d'HITACHI est en technologie SOI.

#### 6.6.6.3 Micro capteurs

Afin d'étendre la fonction de traçabilité à certaines grandeurs physiques, l'utilisation de micro capteurs est envisageable.

Ici, on vise plus particulièrement dans un premier temps des « micro stations » de type météo enregistrant des paramètres tels que la température, la pression et l'humidité ou la mesure des chocs/vibrations, et autres informations pertinentes relatives aux conditions de la vie d'un produit.

Des approches capacitives ou haute impédance permettent de minimiser la consommation.

Selon les performances requises, on peut envisager l'intégration sur la puce RFID ou l'utilisation de micro capteurs réalisés avec une technologie spécifique et montés en modules multi puces.

#### 6.6.6.4 Electronique polymère

L'objectif est d'utiliser les techniques additives d'impression pour fabriquer l'électronique de la puce à l'aide de matériaux polymères semi-conducteurs, conducteurs et isolants. Ce procédé permettrait de réduire notablement les coûts de fabrication et d'atteindre l'objectif de moins de 5 centimes d'euro par étiquette.

Outre la mise au point du procédé de fabrication collective sur grands rouleaux de supports souples, papier ou plastique, les principales limitations actuelles sont les suivantes :

- Faible mobilité des électrons (1000 à 10000 fois moins rapide que l'électronique monocristalline).
- Très fortes tensions de seuil, donc alimentation à fort voltage (10-40V).
- Stabilité des composants organiques dans la durée.
- Indisponibilité de mémoires non volatiles réinscriptibles.

Cependant, on note des progrès significatifs ces derniers temps, en particulier sur la mobilité grâce aux molécules à base de pentacène qui approchent les performances du silicium amorphe.

Compte tenu des performances actuelles en vitesse, des démonstrateurs de laboratoire en BF et HF sont possibles dans un futur proche. Il restera encore à valider le procédé de fabrication et la stabilité dans le temps.

En Europe, des sociétés comme Philips, Siemens (via PolyIC) ou ST Microelectronics travaillent sur le sujet et commencent à montrer des premiers dispositifs fonctionnels.

#### 6.6.6.5 Electronique poly-Si souple

La technologie silicium poly cristallin (poly-Si) est une technologie couches minces (TFT) permettant la réalisation de transistors déposés sur de grandes surfaces (verre, plastique). Le silicium polycristallin est réalisé par recuit d'une couche de silicium amorphe à l'aide de lasers à excimères. Cette technologie est en particulier beaucoup utilisée aujourd'hui pour réaliser des écrans plats ou des cellules photovoltaïques. Elle est adaptée à un dépôt sur une surface souple et possède une mobilité électronique meilleure que celle de la technologie polymère, conduisant à des performances en vitesse relativement satisfaisantes pour une étiquette RFID.

Récemment, TDK et « Semiconductor Energy Laboratory Co Ltd » au Japon ont développé une étiquette Poly-Si souple à 13,56 MHz. Elle possède un microcontrôleur 8bits travaillant à 3,39 MHz. On peut la plier jusqu'à un rayon de courbure de 10 mm.

### 6.6.7 **Technologies concurrentes**

#### 6.6.7.1 Code à barres 1D et 2D

Historiquement, les codes à barres 1D sont la première technologie concurrente des étiquettes RFID. Ils bénéficient d'au moins deux atouts : ils sont déjà largement utilisés et sont très bon

marché. Ils sont lus à distance par un rayon laser et nécessitent donc une vue directe entre le code à barres et le lecteur et ne sont pas modifiables (lecture seule).

Un code à barres 1D comporte une dizaine de caractères. Le type le plus utilisé en Europe est le standard EAN 13 qui comporte 13 symboles.

Actuellement deux grandes techniques de codes 2D sont proposées : la technique d'empilement de codes 1D et la technique matrice de points.

Le premier code à barres 2D (Code 49) a été introduit par Intermec en 1987. C'est une suite de codes 1D empilés verticalement. Les codes à barres 2D peuvent contenir plusieurs centaines de caractères et s'adapter à une surface de 1 à 14 pouces carrés (Data Matrix). Les lecteurs utilisent une caméra CCD associées à un scanner.

#### 6.6.7.2 Technologie SAW (Surface Acoustic Wave)

Il s'agit d'une technologie utilisant les ondes acoustiques de surface. Le dispositif comprend une antenne et un capteur interdigité de deux rangées de doigts montées sur un substrat de Quartz ou en Niobate de Lithium ainsi que des réflecteurs. En réponse à une sollicitation (impulsion) produite par un interrogateur, ce dispositif renvoie une information codée sous la forme d'un « train d'échos » dépendant de la disposition géométrique des réflecteurs. En général, la bande utilisée est celle des UHF.

Le principal avantage de ce dispositif est la très grande rapidité de réponse à l'interrogation, ce qui permet une utilisation sur des systèmes à déplacement rapide avec une grande fiabilité.

### 6.6.8 Acteurs industriels

#### 6.6.8.1 Historique

Historiquement, les offreurs de système RFID ont plusieurs types d'origine :

- des bobineurs (Sokymat, MBBS, ...)
- des spécialistes de la carte sans contact (ASK, Tagsys, ...).
- des fabricants de composants (Texas Instruments, Philips, ST Microelectronics, EM Marin, ...).
- des électroniciens automaticiens (Siemens, Thalès, Omron, Tracetel, I2E...)

L'industrie européenne de la RFID s'était développée essentiellement en HF, du fait de ses racines historiques dans le contrôle d'accès, la télébilletique et la monétique sans contact. Elle s'est aussi développée en BF sous l'impulsion des applications en automobile et des contraintes réglementaires dans l'animalier.

Sous la pression de Wal★Mart et du fait de la réglementation relative au spectre électromagnétique dans cette bande de fréquences, l'offre américaine se développe actuellement en UHF. En Europe, les applications UHF tardent à venir du fait de la réglementation des fréquences et des puissances autorisées. En Asie, aucune bande de fréquence n'était réservée jusqu'à très récemment dans cette bande.

#### 6.6.8.2 Recensement de l'offre

En regardant de près l'offre des fabricants, on constate qu'il y a deux approches principales :

- Soit l'offre répond à un problème spécifique d'une entreprise et on est sur un marché de niches
- Soit l'offre cherche à remplacer le code à barre et on se place d'emblée sur un marché mondial

Dans le premier cas, l'objectif recherché est la performance du système, la contrainte de coût n'étant pas forcément très forte. Des sociétés telles que Athélia, Pygmalion, Spacecode, Savi, se sont développées sur des niches et des marchés très ciblés.

Dans le deuxième cas, les deux principales contraintes sont l'interopérabilité mondiale et le coût unitaire du tag. La standardisation est un élément indispensable de cette offre.

En conséquence, ne sont retenus que les offreurs présents directement ou indirectement en France et proposant des matériels typiquement RFID. Par exemple, sont exclues les entreprises qui fabriquent des imprimantes thermiques et proposent accessoirement des modèles RFID.

Les tableaux ci-dessous donnent un aperçu des produits RFID disponibles sur le marché. Il ne sont pas exhaustifs mais sont représentatifs des solutions mises à disposition des utilisateurs. Les chiffres cités sont tirés des descriptions de produits présentés sur le site de TagProduct (<http://www.tagproduct.com>)

Fréquence	portée	tension	consommation	puissance	interface	compatibilité
2,45 GHz	3 – 10 m	12-24 V			RS232/422/RS485	ND
869 MHz	8 m	220 V	2,5 A	500 mW	RS-232/485	ND
869 MHz	3 m	15 V	0,5 A	500 mW	RS-232	ND
13,56 MHz	2 m environ	230 V	< 100µA (arrêt lecture), < 100 mA (attente tags), < 1,5 A (lecture continue)	4W	RS-232/485	ISO/IEC 15693-2
13,56 MHz	35 cm	24 V	ND	ND	RS-232	ICode + ISO ou Tag-it + ISO
125 kHz	“longue”	230 V	250 mA	ND		EM 4050, EM 4001
125 kHz	“longue”	12-28 V	<200mA max. <10mA veille	ND	RS232/422/RS485	II-2G EEX me IIC T4

**Tableau 20 : Caractéristiques de quelques lecteurs RFID du marché (ND : non divulgué)**

Fréquence	type	autonomie	mémoire (bit)	poids (g)	dimensions (mm)
2,4 GHz	actif	10 ans max	180/136	80	70 x 50 x 20
2,4 GHz	actif	5-7 ans max	180/162	15	85,6 x 54 x 5
13,56 MHz	passif, puce ISO 15693 ou ICode	-	512-2048	disque	diam. : 9, 12, 20, 30 et 50 épais : 4,5
13,56 MHz	passif, puce ISO 15693, TagIt ou ICode	-	512-2048	étiquette	de 20 à 45 sur 42 à 76
125 kHz	passifs RO/RW	-	64-2048	ND	85,6 x 54 x 5
869 MHz	passifs RO	-	48	10	85,6 x 55 x 2,5
869 MHz	passifs RO	-	48	10	210 x 17 x 4

**Tableau 21 : Caractéristiques de quelques tags RFID du marché (ND : non divulgué)**



Caractéristiques/Fréquences	125 150 kHz	à 13,56 MHz	800 à 900 MHz	2,45 GHz
Type de fréquence	Basse	Haute	Bandes UHF	Hyper
Technologie d'antenne	Bobine aérienne boucle ferrite	Boucle ou imprimée, sur perforée gravée	Boucle imprimée, Antenne perforée ou imprimée ou gravée	
Distance de lecture et d'écriture	> 1 m	Europe France : 1 m et volume 1 m <sup>3</sup> USA > 0,8 m	Europe et France : pour le moment limitation d'utilisation en puissance USA de 1 m à 10 m	France < 0,5 m (> 1 m avec dérogation) USA > 1 m
Vitesse théorique de transfert des données	< 10 Kb/s	< 100 Kb/s	< 200 Kb/s	< 200 Kb/s
Influence du métal	Perturbation (Espace > 50 mm = 90 % Pref.)	Perturbation (Espace > 50 mm = 90 % Pref.)	Atténuation (Espace > 10 mm = 90 % Pref.)	Atténuation (Espace de 5 à 7 mm = 100 % Pref.)
Influence de l'eau	Aucune	Atténuation	Atténuation	Perturbation
Influence du corps humain	Aucune	Atténuation	Atténuation	Perturbation

**Tableau 22 : Utilisation et limitations des différentes versions de RFID [Jeanne-Beylot 03].**

Les principaux intervenants sont recensés ci-après.

#### 6.6.8.3 Fabricants de composants électroniques

<b>PRODUITS</b> <b>Légende:</b> <b>C concepteur</b> <b>F fabricant</b> <b>R revendeur</b>	<b>Puces</b>	<b>125 kHz</b> <b>148 kHz</b>	<b>13,56 MHz</b>	<b>400 MHz</b>	<b>8-900 MHz</b>	<b>2,45 GHz</b>
Atmel	F	★	★		★	
EM Microelectronic Marin	F	★	★		★	★
Hitachi	F					★
ID3 Semiconductors	C	★	★		★	★
Infinéon	F		★			
Inside Contactless	C		★		★	
Philips Semiconductors	F	★	★		★	★
ST Microelectronics	F		★		★	
Tagsys	C		★		★	
Texas Instruments, TIRIS	F	★	★		★	

#### **Hitachi (Japon) :**

A développé un « µchip » SHF 0,3 mm x 0,3 mm antenne comprise.  
Il vient de sortir une nouvelle puce de 0,15mm x 0,15mm et de 75 µm d'épaisseur proposée depuis peu en UHF.

#### **Infineon(ex Siemens) (D) :**

Etudie et développe des technologies en électronique polymère associées à de l'impression grande échelle pour baisser à terme les coûts incompressibles du couple Silicium/Packaging. Pour mémoire, Infineon a été l'un des leaders de la BF en applications animales

#### **Philips Semiconductors :**

A été un des premiers à s'investir dans le domaine de la RFID ;

Le rachat de la société autrichienne Mikron en 1995 a conforté son positionnement dans la bande HF. Philips a été très moteur dans les comités de normalisation « Cartes à puces sans contact » puis RFID. Les produits de cette société sont à l'origine des normes ISO/IEC 14443 type A et ISO/IEC 15693 (ISO/IEC 18000-3).

Propose des circuits pour tags dans quasiment toutes les bandes de fréquence.

Philips propose sa technologie MiFare pour les cartes à puce sans contact, dont un des fabricants est ACG (<http://www.acg-id.com>).

#### **µEM – EM Microelectronic – Marin SA**

Filiale du groupe suisse SMH (Swatch), leader mondial de l'horlogerie électronique.

Les acquis en conception et fabrication de composants pour montres électroniques à grande autonomie ont permis une diversification précoce dans les puces télé alimentées de type RFID.

Propose des circuits pour tags dans quasiment toutes les bandes de fréquence.

#### **TIRIS – Texas Instruments Radio frequency Identification System**

Branche RFID de Texas Instruments.

A démarré avec des produits BF, puis a couvert peu à peu toutes les gammes de fréquences. Ont été actifs au niveau normalisation, en particulier sur la norme ISO/IEC 15693 (ISO/IEC 18000-3) en partenariat avec Philips.

#### 6.6.8.4 Fabricants de tags

<b>PRODUITS</b> <b>Légende:</b> <b>C concepteur</b> <b>F fabricant</b> <b>R revendeur</b>							
	Inlays	Tags	125 kHz 148 kHz	13,56 MHz	400 MHz	8-900 MHz	2,45 GHz
AGID		R	★	★			★
ASSA ABLOY (ACG+Sokymat+ex Metget+ex Cubit)	F	F	★	★		★	
ASK	F	F		★		★	
Athélia		F/R	★	★			
Balogh		F	★	★			★
Deister GmbH	F	F	★	★	★	★	★
Elisphere		F	★	★			
EMS Datalogic		F	★	★	★	★	
I S R A		F		★			
I2E Stella	R	R		★		★	
ID.E.A		R	★	★			
Identec Solutions GmbH		F	★	★		★	
IER (Idéal Tag)		F		★		★	
Inside Contactless		F		★		★	
Intermec Technologies Corporation		F				★	★
iPICO		F				★	
KSW-Microtec (All)	F			★		★	
Matrics	F					★	
MBBS	F	F	★				
Metget	F	F	★	★			
Nagra ID	F	F	★	★			
Philips Semiconductors	F		★	★		★	★
Pygmalion	F	F		★			
Rafsec	F			★		★	★
Réseaumatique		F	★	★			
Sefea		F	★	★			
Siemens AG	F	F	★	★	★		★
Smart Tracing	R	R		★			
Space Code Intercode	F	F	★				
ST Microelectronics	F	F		★		★	
STID	R	R	★	★		★	
TagProduct	R	R	★	★		★	
Tagsys	F	F	★	★		★	
Texas Instruments TIRIS	F	F		★			
Tracetel	R	F	★	★		★	
X-Ident	F	F		★		★	

**Alien Technology (USA) :**

Puces UHF - Spin-off du MIT.  
Activités de développement innovantes (Liquid Self-Assembly notamment)  
Financements importants du DoD.  
Sous-traitance d'une partie de sa conception et de ses fabrications (ST micro).

**ASK (F) :**

Pionnier dans le domaine des titres de transport sans contact.  
Diversification du ticket de transport sans contact à usage unique bas coût vers le tag d'identification C.Ticket vers C.Label en HF.  
Diversification en étiquettes UHF

**AXCESS inc. (USA)**

Possède une gamme importante de tags RFID actifs  
([http://www.axcessinc.com/prod\\_transponders.php](http://www.axcessinc.com/prod_transponders.php))

**IDENTEC SOLUTIONS (USA, Autriche)**

Propose des tags actifs (<http://www.identecsolutions.com/tags.asp>) :

- i-D avec 64 octets de données stockées, une portée de 6 m, une durée de vie de 6 ans au format carte de crédit.
- i-Q avec 8 ou 32 ko de données stockées, une portée de 100 m, une durée de vie de 6 ans, au format briquet.

**Matrics (USA, entité de Symbol Technologies) :**

Fabrique des antennes et des tags en UHF.

**PygmaLyon (F)**

Spécialiste mondial du chronométrage d'événements sportifs par dossards électroniques en HF

**SAVI (USA)**

Spécialiste des tags actifs à 433 MHz pour la traçabilité des conteneurs en particulier pour le DoD.

**SpaceCode (F)**

Positionné sur des produits BF

**Thales Communications et CS Systèmes d'info :**

Proposent dans un segment proche des badges de télépéage à 5,8 GHz.

#### 6.6.8.5 Fabricants d'interrogeurs

<b>PRODUITS</b> <b>Légende:</b> <b>C concepteur</b> <b>F fabricant</b> <b>R revendeur</b>	Interrogeurs	125 kHz	148 kHz	13,56 MHz	400 MHz	8-900 MHz	2,45 GHz
		148 kHz					
ACREON	F	★	★			★	★
AGID	R	★	★				★
ASK	F		★			★	
Athélia	F/R	★	★				
Atmel	F	★	★				
AXIOME	F	★	★				
AWID	F	★	★			★	★
Balogh	F	★	★				★
Deister GmbH	F	★	★	★	★	★	★
Elisphere	F	★	★				
FEIG Electronic GmbH	F	★	★			★	
I2E Stella	F		★			★	
ID.E.A	R	★	★				
ID3 Semiconductors	C	★	★			★	★
IDENTEC Solutions GmbH	F	★	★			★	
IER (Idéal Tag)	F		★			★	
Intermec Technologies Corp	F					★	★
iPICO	F					★	
Magellan Technology	F		★				
Matrics	F					★	
MBBS	F	★					
Philips Semiconductors	F	★	★			★	★
Psion	F		★				
Pygmalion	F		★				
Réseaumatique	F	★	★				
SAMSys	F	★	★			★	★
Siemens AG	F	★	★	★			★
Smart Tracing	R		★				
Space Code Intercode	F	★					
STID	F	★	★			★	
TagProduct	R	★	★			★	
Tagsys	F/R		★				
Tracetel	F	★	★			★	

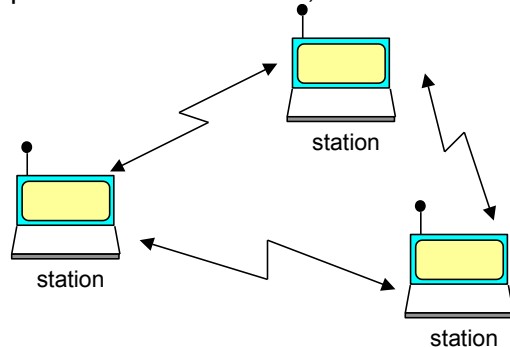
### 6.6.9 802.11

#### 6.6.9.1 Description générale

WiFi (aussi connu sous le nom de IEEE 802.11 [802.11], [Crow 97] est une norme internationale (ISO/IEC 8802-11), définie à l'origine par l'association IEEE. C'est un réseau local sans fil pour la bureautique ou les applications personnelles. Cette norme définit la couche physique et la

partie MAC de la couche « Logical Link Control ». Plusieurs versions sont normalisées (IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g, etc.)

La présente description porte sur la version 802.11 d'origine, dans la mesure où les applications visées n'ont pas de besoin très élevés en terme de débit. Cette version offre deux modes de fonctionnement : l'un appelé « ad-hoc », l'autre « infrastructure ». Le mode ad-hoc (IBSS) ne fournit aucune coordination entre les stations. La seule communication qui puisse être établie dans ce mode est en point à point. Sur la base de ce type de communication, d'autres type peuvent être construits, mais ils ne sont pas présents nativement dans la norme.



**Figure 41 : Exemple de réseau en mode ad-hoc**

Dans le mode infrastructure, une station, appelée station de base, organise les échanges et l'ensemble des stations constituent alors un réseau cohérent appelé cellule. La station de base permet également de connecter la cellule à d'autres réseaux (comme Ethernet) et joue alors le rôle de pont.

#### 6.6.9.2 802.11.P

En Europe, 802.11p est utilisé comme la base du standard ITS-G5, qui supporte le protocole GeoNetworking pour les communications véhicule à véhicule et véhicule à infrastructure. ITS G5 & GeoNetworking sont des standards de l'European Telecommunications Standards Institute group pour les Systèmes de Transport Intelligents.[4]

##### 6.6.9.2.1 Description

As the communication link between the vehicles and the roadside infrastructure might exist for only a short amount of time, the IEEE 802.11p amendment defines a way to exchange data through that link without the need to establish a basic service set (BSS), and thus, without the need to wait for the association and authentication procedures to complete before exchanging data. For that purpose, IEEE 802.11p enabled stations uses the wildcard BSSID (a value of all 1s) in the header of the frames they exchange, and may start sending and receiving data frames as soon as they arrive on the communication channel.

Because such stations are neither associated nor authenticated, the authentication and data confidentiality mechanisms provided by the IEEE 802.11 standard (and its amendments) cannot be used. These kinds of functionality must then be provided by higher network layers.

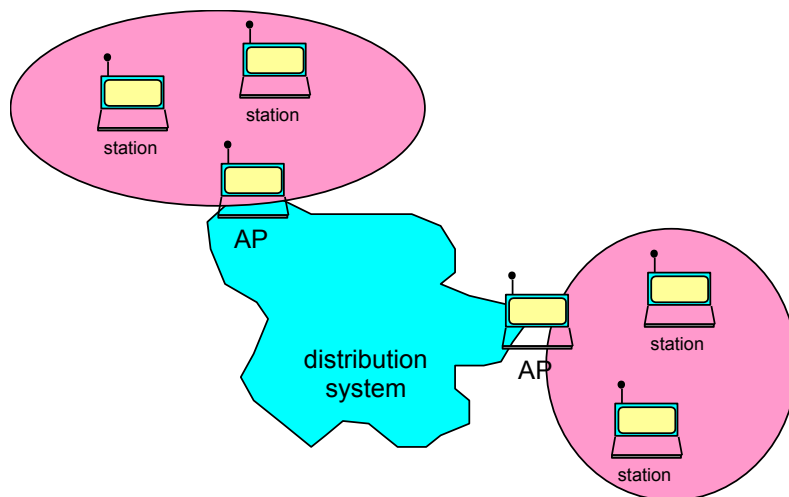


Figure 42 : exemple de réseau en mode infrastructure, connecté à un autre réseau

Trois couches physiques sont spécifiées :

- Une version basique à 1 et 2 Mbit/s à 2,4 GHz ou dans l'infrarouge,
- Une version étendue (802.11b) à 5.5 et 11 Mbit/s à 2,4 GHz,
- Une version haute vitesse (802.11a) jusqu'à 54 Mbit/s dans la bande ISM (5 GHz).

Toutes utilisent la technique Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) sur les canaux RF. La version haute vitesse utilise également la technique Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) sur 52 sous-porteuses, modulées en Binary ou quadrature phase shift keying (BPSK / QPSK), 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) et 64-QAM.

La couche physique RF opère dans la bande de 2.4 à 2.48356 GHz et peut utiliser deux types de modulation : le type Direct séquence (11 chips, 30 MHz entre canaux, 1, 2, 5.5 et 11 Mbit/s) et le type Frequency Hopping scheme (79 canaux, 3 ensembles de 26 séquences de saut, à plus de 2.5 sauts/s). La portée est d'environ 30m à l'intérieur et 200m à l'extérieur. L'utilisation d'antennes directives ou MIMO permet d'augmenter ces portées. La couche physique infrarouge opère par modulation de position d'impulsion à 1 ou 2 Mbit/s.

La trame IEEE 802.11 est décrite dans la Figure 43.

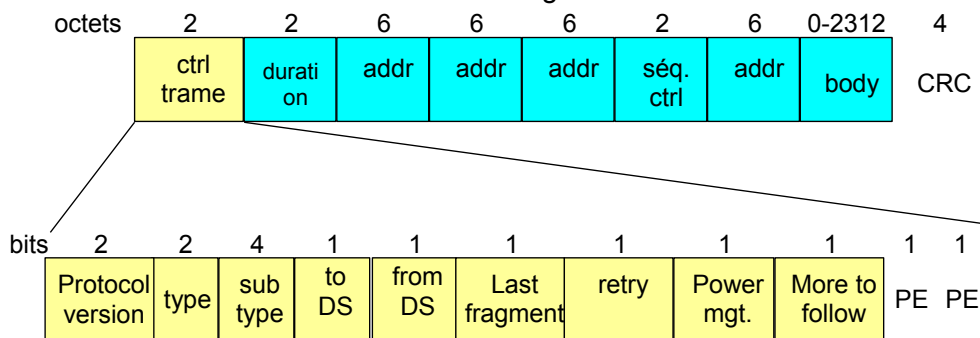


Figure 43 : Structure de la trame 802.11

Deux contrôles d'accès au médium sont définis dans 802.11 : le contrôle « Distributed Coordination Function » (DCF) et le contrôle « Point Coordination Function » (PCF) qui est optionnel. Le contrôle DCF offre des services de transfert sans garantie temporelle. CSMA avec évitement de collision ou CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) est utilisé comme MAC par DCF. PCF offre des garanties temporelles, car dans ce mode, une station particulière (Point Coordinator) crée un cycle pour le trafic. Ce cycle est divisé en deux parties, la première sans contention, la seconde avec contention comme en mode DCF. Le MAC utilisé dans ce cas est maître-esclave.

La norme définit également des mécanismes de cryptage basés sur des clés de longueur maximale 128 bits.



#### **6.6.9.2.2 Avantages et inconvénients**

IEEE 802.11 est largement disponible dans ses versions 11 Mbit/s ou 54 Mbits/s DSSS. Il supporte les transferts isochrones, qui sont les seuls offrant des garanties temporelles. En utilisant PCF, d'autres types de transferts garantis pourraient être implémentés. IEEE 802.11 est compatible avec les autres piles de protocoles définies dans les normes de LAN. Le débit est important et la portée est classique.

Néanmoins, IEEE 802.11 est soumis aux interférences nombreuses dans ce domaine de fréquence (aucune licence nécessaire), où résident de nombreux autres produits comme Bluetooth, Zigbee et d'autres choses non normalisées (caméras, etc.) Le mode PCF n'est pas souvent implémenté dans les produits et reste donc peu utilisé.

IEEE 802.11b est une version du 802.11 original sans la fonction PCF. 802.11g augmente le débit à 54 Mbit/s. 802.11a [802.11a] propose 25 Mbit/s et plus dans les gammes de 5.15-5.35 et 5.725-5.825 GHz, tout en utilisant la technique de modulation OFDM, mais il n'est pas autorisé dans tous les pays. 802.11e est un MAC utilisable par toutes les couches physiques qui introduit la notion de qualité de service et de garanties temporelles.

La consommation des modules WiFi est en général élevée. A l'émission, la consommation est d'environ 400 mA. En veille, la consommation est d'environ 20 mA.

La taille de l'implantation de la pile de protocole est d'environ 100 Ko, ce qui dépasse en général largement les capacités des plates-formes des réseaux de capteurs.

#### **6.6.9.2.3 Fournisseurs et produits**

Comme pour Bluetooth, le nombre de fournisseurs et de produits est grand, même si une concentration des industriels (essentiellement par rachat) a eu lieu ces dernières années.

### **6.6.9.3 Algorithmes de contrôle d'accès au médium et de routage**

#### **6.6.9.3.1 Architecture de communication**

L'architecture de communication se décline sous deux formes.

Une première forme (dite opérationnelle) indique quels sont les éléments qui entrent dans la composition du système de communication et quelles sont les fonctions qu'ils assurent dans la communication. Elle décrit également les flux d'informations ainsi que leurs caractéristiques spatiales (lieu de production et de consommation) et temporelles (périodicité, délais, temps de réponse, etc.) Elle est souvent le résultat d'une analyse des besoins de l'application et des contraintes qui sont imposées au système. Ce type d'architecture n'est pas l'objet de ce paragraphe.

Une deuxième forme indique quels sont les éléments qui entrent dans la composition des différents nœuds qui composeront le système de communication. Cela comprend habituellement une instanciation des couches de communication présentes dans le modèle OSI. Dans le cas des réseaux de capteurs sans fil (qui plus lorsqu'ils sont autonomes), la présence des sept couches traditionnelles du modèle OSI n'est à la fois pas souhaitable, ni requise. Cette constatation avait déjà été faite dans le cas des bus de terrains (parfois aussi appelés aussi « réseaux locaux industriels »). Dans de ces systèmes de communication, les seules couches présentes sont celles liées à la politique d'accès au médium, les mécanismes d'adressage au sein du réseau, les mécanismes éventuels de détection et de gestion des erreurs de transmission et les protocoles de transfert d'information (qu'ils soient effectués en point à point sans intermédiaire ou par sauts multiples). On trouve donc les couches incluant le « Medium Access Control », une partie des fonctions de « Logical Link Control » et le routage des paquets et enfin l'application qui échange des informations.

#### **6.6.9.3.2 Medium Access Control**

Sous le terme de « Medium Access Control » sont regroupées plusieurs fonctions, comme par exemple la politique d'accès au médium et la gestion des erreurs de transmission des paquets individuels. Cette couche ne traite pas de la gestion des erreurs de transmission des « informations » (vs. paquets) en elle-même qui est laissée à la responsabilité de l'application. A

titre d'exemple, une alarme est une information dans une application de surveillance ; cette information peut être transférée au moyen d'un ou plusieurs paquets.

De nombreux algorithmes de contrôle d'accès au médium ont été développés ces dernières années pour optimiser le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fil, en fonction de différents critères (minimisation de la consommation, du temps de transfert, du nombre de liens traversés, etc.) et paramètres (nombre de nœuds présents dans le réseau, type et taille des informations transférées, type de trafics, périodicité, etc.). Chaque algorithme présente donc des avantages pour les critères qu'il est sensé optimiser et n'est pas optimal pour la plupart des autres critères.

Néanmoins, la plupart du temps, le critère principal à optimiser est celui de la consommation. Les principales sources identifiées de consommation d'énergie sont [Ye 02] :

- « idle listening » : l'écoute à vide, lorsqu'un nœud se réveille alors qu'il n'y a rien à écouter,
- « overhearing » : l'écoute inutile, lorsqu'un nœud se réveille pour écouter quelque chose qui ne lui est pas destiné,
- « collision » : lorsqu'un voisin brouille une communication en cours, la retransmission qui s'ensuit correspond à une sur-consommation,
- « overhead » : la surcharge des données utiles correspond aux informations ajoutées par les différents protocoles de communication mis en œuvre pour acheminer l'information. Dans certains cas, cette surcharge est majoritaire par rapport à la taille des données utiles.

Une revue complète des protocoles MAC basse consommation est disponible dans [El-Hoiydi 04]. La même source étudie les protocoles pour les réseaux sans fil qui ne sont pas particulièrement efficaces dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil : IEEE 802.11 (modes infrastructure et ad-hoc), Hiperlan 1 et 2, les systèmes de paging (POCSAG, FLEX, HERMES) et les systèmes dits « personnels » comme Bluetooth, IEEE 802.15.4,

La Figure 44 montre la classification des différents algorithmes de contrôle d'accès au médium pour les réseaux de capteurs sans fil.

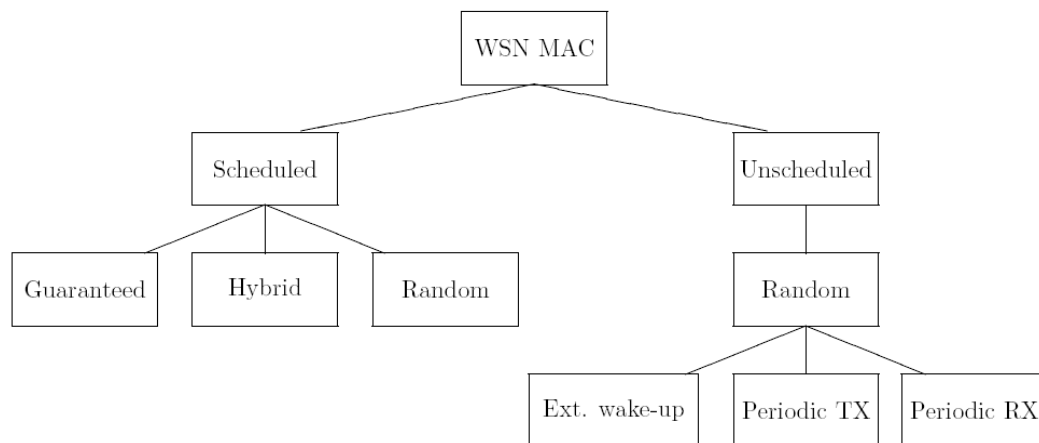


Figure 44 : Classification des algorithmes de contrôle d'accès au médium (pour les réseaux de capteurs sans fil) [El-Hoiydi 04]

Dans la catégorie « Guaranteed » : SMACS [Sohrabi 00], LEACH [Heinzelmann 00], PACT [Pei 01], BMA [Li 04], BitMAC [Ringwald 05].

Dans la catégorie « Hybrid » : EMAC [van Hoesel 04], LMAC [van Hoesel 04-2].

Dans la catégorie Random : S-MAC [Ye 02], T-MAC [van Dam 03], D-MAC [Lu 04].

Dans la catégorie external wake-up : PicoRadio [Rabaey 00]

Dans la catégorie Periodic TX : PicoNet [Bennett 97], 802.15.4 [LR-WPANS 03]

Dans la catégorie Periodic RX : STEM [Schurgers 02], NP-CSMA-PS [El-Hoiydi 02], WiseMAC [El-Hoiydi 03], B-MAC [Polastre 04]

S-MACS et LEACH sont basés sur le principe d'un accès ordonnancé garanti (de type TDMA). Ce principe est réputé pour être simple mais plutôt grand consommateur d'énergie si la

périodicité des transfert n'est pas celle de l'ordonnancement du protocole. PicoNet et IEEE 802.15.4 sont basés sur la transmission périodique des informations. Leur « overhead » est bien supérieur à celui de S-MAC. STEM utilise un principe de réveil similaire à celui de la détection de préambule. Son overhead est identique à celui de S-MAC, mais il nécessite l'envoi préalable d'un ensemble de paquets pour réveiller la destination et ne dispose pas d'un MAC basse consommation pour le transfert subséquent des données. EMAC et LMAC ont des overheads plus importants que ceux de S-MAC. S-MAC et T-MAC restent donc les principaux MAC basse consommation (D-MAC est une variante de S-MAC qui réduit le délai de transmission dans certaines applications). WiseMAC est un protocole de contrôle d'accès au médium qui consomme moins que S-MAC et T-MAC pour les applications à faibles débits et faible « duty-cycle » [El-Hoiydi 04].

Propriété intellectuelle

Les spécifications et descriptions détaillées de chacun de ces algorithmes sont disponibles librement. La difficulté essentielle réside dans la difficulté d'implémentation de ces algorithmes sur des plates-formes aux ressources limitées.

### 6.6.9.3.3 Routage

Les algorithmes de routage sont responsables de l'identification des nœuds (ceci est parfois assuré par les algorithmes de MAC) participant à la communication, ainsi que de la mise en place des mécanismes de transfert des paquets d'un point à un autre dans le réseau. On parle en général à cet effet d'établissement de routes entre les différents points du réseau. Ces routes peuvent être directes ou bien passer par des nœuds intermédiaires (réseaux à sauts multiples). Les algorithmes de routage disponibles aujourd'hui pour les réseaux de capteurs sont nombreux et variés, mais on distingue les algorithmes privilégiant les échanges en point à point (« one-to-one ») de ceux privilégiant les échanges « tous vers un » (« all-to-one »).

Algorithmes « one-to-one »

Les algorithmes « one-to-one » peuvent être regroupés dans les catégories suivantes :

- Les algorithmes proactifs, parmi lesquels Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV) et Optimized Link State Routing (OLSR),
- Les algorithmes réactifs, parmi lesquels Dynamic Source Routing (DSR), Ad hoc On demand Distance Vector (AODV) et Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA),
- Les algorithmes hybrides comme Zone Routing Protocol (ZRP),
- Les algorithmes hiérarchiques comme Cluster Based Routing Protocol (CBRP)

Ces algorithmes tendent à optimiser un des critères suivants (sont listés les critères les plus populaires) :

- minimisation du nombre de sauts,
- minimisation du temps de transfert,
- « route la plus énergétique », c'est à dire constituer des routes ayant une moyenne d'énergie restante maximale,
- maximisation de la durée de vie du réseau, c'est à dire essayer de passer par les nœuds disposant du plus d'énergie restante,
- minimisation de la consommation.

Des études ([Broch 98], [Fall 98], [Johansson 99], [Cano 00]) ont été faites pour comparer les performances de quatre protocoles dans différentes situations. Les protocoles qui ont été implantés, simulés et comparés sont DSR, DSDV, TORA et AODV. Les performances qui ont été testées sont la consommation d'énergie, le nombre de messages de routage (overhead), la longueur des chemins, le délai de transmission et le débit. Le débit correspond au nombre de paquets envoyés et arrivés à destination dans un certain laps de temps.

En terme de débit, les deux algorithmes qui ont le meilleur débit quelque soit la mobilité du réseau sont DSR et AODV. TORA est proche. DSDV est meilleur que TORA lorsque la mobilité est faible, mais il voit ses performances chuter lorsque le réseau est très mobile. A noter que les performances de TORA diminuent fortement dès que le nombre de sources augmente.

En terme « d'overhead », DSDV a le même overhead quelque soit la mobilité du réseau, étant donné que c'est un protocole proactif, alors que l'overhead des autres protocoles a tendance à

diminuer lorsque la mobilité du réseau décroît. Ainsi, l'overhead de DSDV est plutôt bon par rapport aux autres protocoles lorsque le réseau est mobile, mais il est mauvais lorsque le réseau est statique. Dans le réseau mobile, TORA et AODV ne sont pas très bons, mais AODV est très efficace dans les réseaux statiques. DSR a un overhead faible quelle que soit la mobilité du réseau. Lorsque le nombre de sources augmente, l'overhead s'accroît également dans une moindre mesure pour DSR et AODV, mais il explose pour TORA.

En terme de délai, les résultats montrent que lorsque le nombre de liens brisés augmente, le délai en fait de même, ce qui correspond aux attentes. AODV offre un délai proche du double de ceux de DSR et DSDV lorsque le taux de liens brisés est élevé.

En terme de consommation, quelle que soit la mobilité du réseau, la vitesse, le nombre de sources, la taille du réseau et le taux d'envoi des paquets, l'algorithme TORA consomme en moyenne cinq à six fois plus que les trois autres algorithmes. DSR est de peu le meilleur, alors que AODV et DSDV se partagent les deuxième et troisième places selon la mesure que l'on utilise. AODV est meilleur lorsque le nombre de nœuds du réseau est grand ou que le réseau est peu mobile alors que DSDV est meilleur lorsque la vitesse du réseau est élevée.

Algorithmes « all-to-one »

Les algorithmes « all-to-one » assurent le transfert des données vers un puits (« convergcasting »). Ils peuvent être regroupés dans les catégories suivantes :

- Les algorithmes event-driven, tels que Directed Diffusion, Multi et Sensor protocols for information via negotiation (SPIN)
- Les algorithmes continuous monitoring, tels que Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH), Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS), Maximum Lifetime Data Aggregation (MLDA) et Cascading Timeouts

Le plus gros problème des algorithmes all-to-one est que les nœuds les plus près de la station de base doivent relayer les messages des nœuds plus éloignés, ce qui a pour conséquence une plus grande consommation d'énergie et un temps de vie plus court pour certains nœuds, ce qui peut pénaliser le réseau. C'est pourquoi l'algorithme Directed Diffusion tente de trouver un chemin commun à tous les nœuds qui observent le même événement afin que les données puissent être fusionnées et envoyées une seule fois par les nœuds critiques. L'algorithme Multi tente de minimiser le nombre d'inondations nécessaires pour le rapatriement rapide des informations, mais les nœuds critiques devront relayer autant de messages que d'événements observés. SPIN ne règle pas non plus le problème des nœuds critiques, mais réduit l'inondation. Cette réduction dépend fortement du nombre de nœuds qui sont intéressés à recevoir les données, dans certains cas les données peuvent ne pas arriver à la station de base. Dans les réseaux où les événements qui se produisent génèrent que peu de messages, l'algorithme Directed Diffusion engendre beaucoup d'inondations, c'est pourquoi on lui préfère un algorithme plus simple comme Multi. Par contre si les événements génèrent de nombreux messages vers la station de base, la fusion des données et leur acheminement par un seul chemin permet de bien réduire la différence de consommation entre les nœuds.

Dans les algorithmes de surveillance continue (continuous monitoring), LEACH et PEGASIS font l'hypothèse que chaque nœud peut atteindre la station de base en un seul hop moyennant une transmission à une puissance plus élevée, ce qui est une contrainte plutôt forte pour un réseau. Néanmoins si cette contrainte est vérifiée, ces deux algorithmes permettent de bien répartir la charge de trafic. MLDA nécessite une connaissance totale de la topologie du réseau, ce qui suppose autant de diffusions par nœud que le diamètre du réseau. De plus cet algorithme a une

complexité de  $O(n^3)$  où  $n$  est le nombre de nœuds du réseau, ce qui le rend inutilisable dans des réseaux très vastes. De plus il suppose que les nœuds ne sont pas mobiles et que les liens de départ ne sont jamais brisés. L'algorithme Cascading Timeouts règle le problème des nœuds critiques, car chaque nœud transmet exactement le même nombre de messages pendant un intervalle donné. De plus il nécessite une seule inondation pour synchroniser le réseau. Par contre dans les réseaux dont le diamètre est grand, le temps d'acheminement des données peut être élevé.

Le Tableau 23 récapitule les différents points positifs et négatifs de chacun des algorithmes, en fonction de la taille des données stockées sur chacun des nœuds, la minimisation du nombre de

sauts nécessaire à l'établissement d'une route, l'adéquation à la dynamique dans le réseau et l'abstraction de la connaissance préalable de la topologie du réseau.

Paramètres Type d'algorithme	Réduction	Nb Hops	Dynamique/ Statique	Connaissance topologie
First-Parent-Based	++	-	+	++
Random-Parent-Based	+	-	+	++
TPD	+	+	+	+
PDP	+	+	+	+
CBF by index	-	+	-	+
CBF by neighbours	-	+	-	+
DSB	+	+	-	-
AMCDS	+++	-	+	- - -

Tableau 23 : appréciation des algorithmes de routage selon quelques paramètres

Propriété intellectuelle

Les spécifications et descriptions détaillées de chacun de ces algorithmes sont disponibles librement. La difficulté essentielle réside dans la difficulté d'implémentation de ces algorithmes sur des plates-formes aux ressources limitées.

#### 6.6.9.3.4 Application

Puisque seule une partie des couches du modèle OSI est implémentée dans les réseaux de capteurs sans fil, un grand nombre de responsabilités incombent à l'application.

#### 6.6.9.3.5 Interfaçage et combinaisons

Le choix du matériel et des couches MAC et routage implantées au sein d'un nœud participant à un réseau de capteurs sans fil doit se faire conjointement. La plupart des algorithmes s'appuient en effet sur certaines propriétés des couches inférieures et ils sont conçus pour être utilisés d'une manière spécifique par les couches supérieures pour être efficaces. De plus le choix des ces algorithmes doit être influencé par les caractéristiques de l'application qui va exploiter le réseau. Enfin, l'optimisation des ressources autres que l'énergie complexifie l'implémentation des algorithmes (jusqu'à la rendre impossible parfois).

## 6.7 Abréviations

Alr : Advanced Infrared  
 ACL : Asynchronous Connection-less  
 BPSK : Binary phase shift keying  
 CA : Collision Avoidance  
 CRC : Cyclic Redundancy Code  
 CDMA : Code Division Multiple Access  
 CEM : Compatibilité électromagnétique  
 CSMA : Carrier Sense Multiple Access  
 CSMA/CA : CSMA with Collision Avoidance

DCF : Distributed Coordination Function  
DECT : Digital Enhanced Cordless Telecommunications  
DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum  
FEC : Forward Error Correction  
FH-CDMA : Frequency Hopping-Code Division Multiple Access  
FM : Frequency Modulation  
FSK : Frequency Shift Keying  
FTP : File Transfer Protocol  
HDLC : High-Level Data Link Control  
IBSS : Independant Basic Service Set  
ICMP : Internet Control Message Protocol  
IrDA : Infrared Data Association  
ISM : Industrial Scientific Medical  
L2CAP : Logical Link Control and Adaptation Protocol  
LLC : Logical Link Control  
LM : Link Management  
MAC : Medium Access Control  
MTBF : Medium Time Before Failure  
NRM : Normal Response Mode  
OBEX : OBject EXchange  
OFDM : Orthogonal frequency division multiplexing  
OOK : On-Off-Keying  
PCF : Point Coordination Function  
PWM : Pulse Width Modulation  
QPSK : Quadrature phase shift keying  
RFID : Radio-Frequency Identification  
RZI : Return to Zero Inverted  
SCO : Synchronous Connection-Oriented  
SDP : Service Discovery Protocol  
TDMA : Time-Division Multiple Access  
UWB : Ultra-Wide Band  
VCO : Voltage Oscillator Controller

## 7 TECHNOLOGIES POUR LA SIGNALISATION.

Nous avons identifié 2 axes principaux de signalisation :

La signalisation horizontale

La signalisation verticale

Cette fonction est optique par essence, le récepteur étant l'œil de l'utilisateur. L'œil peut être assisté par une caméra de visualisation, mais la signalisation reste optique.

Les méthodes de communications ont été largement décrites aux paragraphes précédents, notamment les communications radio qui sont matures. Cette maturité s'accompagne d'ailleurs d'un phénomène d'encombrement du spectre disponible. Une voie de désengorgement est la communication par la lumière visible (ou proche visible) des LEDs.

Les LEDs sont largement utilisées aujourd'hui dans la signalisation, tant horizontale que verticale, aussi il nous semble important d'ajouter une 3ème axe à ce paragraphe sur la communication par la lumière.

Quelles sont les technologies associées ?

Comme indiqué, nous identifions les LEDs, mais la nature de plus en plus complexe des messages affichés suggère d'envisager également les OLEDs.

A noter que les écrans de type publicitaires à LCD ou à LEDs se rapprochent beaucoup des panneaux à messages variables (PMV) à LEDs.

### 7.1 Les LEDs

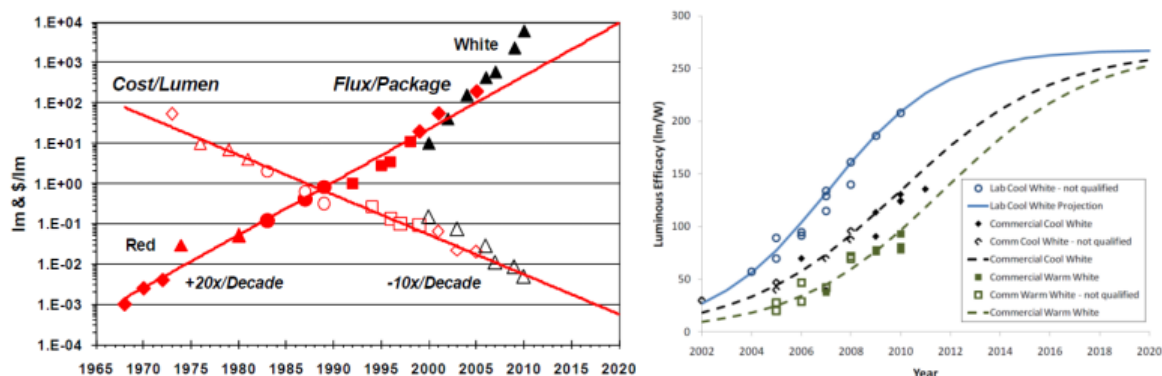
Les arguments mis le plus souvent en avant pour utiliser des LED dans un système d'éclairage ou de signalisation sont la durée de vie du composant et la performance énergétique. Les freins à leur utilisation sont souvent le coût et la spécificité de mise en œuvre.

La technologie des LEDs est aujourd'hui mature et elles remplacent avantageusement des sources de lumière des feux tricolores, des signalisations piétonnes, des panneaux à message variables. Elles sont également utilisées pour des panneaux de limitation ou d'interdiction, en général à base de LED rouges et LEDs blanches.

#### 7.1.1 Efficacité des LEDs.

Elle augmente régulièrement et suit une loi similaire à la loi de Moore en microélectronique, la loi de Hayes. Cependant la théorie indique que les performances arriveront à une saturation dans les années 2015-2020 pour les LEDs blanches.

En parallèle, leur coût suit une loi inverse de réduction régulière.



**Figure 45 Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan March 2011 (Updated May 2011)**

Pour des applications de signalisation dynamique, ces performances permettent d'envisager des systèmes autonomes énergétiquement, au moins sur des installations de type PMV (Panneau à Message Variable). Cependant pour une signalisation horizontale, encastrée dans les voies de circulation, la problématique de la production et du stockage d'énergie ne semble pas avoir encore de solution crédible.

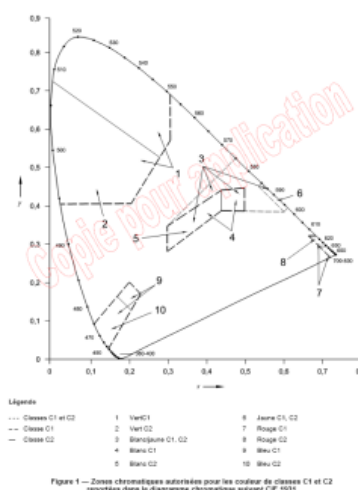
### 7.1.2 Couleurs disponibles.

La réglementation actuelle impose des couleurs spécifiques.

- Vert C1
- Vert C2
- Blanc/jaune C1, C2
- Blanc C1
- Blanc C2
- Jaune C1, C2
- Rouge C1
- Rouge C2
- Bleu C1
- Bleu C2

Ces couleurs sont indiqués dans le document : P98-572-1-NF EN 12966-de janvier 2006.

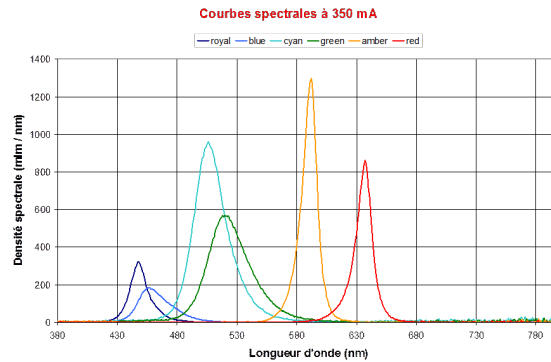
Couleur	Point	Coordonnées de la couleur					
		1	2	3	4	5	6
Rouge	x	0,660	0,680	0,735	0,721	—	—
	y	0,320	0,320	0,265	0,259	—	—
Jaune	x	0,536	0,547	0,613	0,593	—	—
	y	0,444	0,452	0,387	0,387	—	—
Blanc	x	0,300	0,440	0,500	0,500	0,440	0,300
	y	0,342	0,432	0,440	0,382	0,382	0,276
Blanc/jaune	x	0,479	0,300	0,300	0,440	0,618	—
	y	0,520	0,342	0,276	0,382	0,382	—
Vert	x	0,310	0,310	0,209	0,028	—	—
	y	0,684	0,562	0,400	0,400	—	—
Bleu	x	0,109	0,204	0,233	0,149	—	—
	y	0,087	0,196	0,167	0,025	—	—



**Figure 46 Diagramme de couleur permettant de positionner les normes relatives à diverses applications.**

La technologie LED ne permet d'adresser que quelques couleurs dans le spectre visible (bleu, vert, ambré, rouge principalement). En parallèle, les LEDs permettent de faire du blanc avec l'association d'une LED bleu et d'un luminophore « jaune ». Une partie du bleu est absorbée par le luminophore et réémise selon un spectre large jaune. Les deux spectres forment une lumière perçue blanche.





**Figure 47: Spectre type des LEDs disponibles sur le marché. L'échelle verticale représente une efficacité visuelle et tient compte de la sensibilité de l'œil humain.**

Pour obtenir des couleurs plus variées, on utilise l'association de 3 LEDs R(ouge) V(erte) B(leue). Comme sur les écrans ou moniteurs informatiques, c'est la proportion de chacune des couleurs qui donne une perception d'une couleur. Ces produits sont courants et permettent facilement de concevoir des affichages bicolores (vert-rouge), tricolores (rouge vert orange) ou multicolores.

### 7.1.3 Durée de vie des LEDs

C'est un élément important de cette technologie. Après l'efficacité des LEDs, c'est leur durée de vie qui permet des économies substantielles de maintenance. Elle permet également des applications nouvelles. En effet 60,000 heures représentent un fonctionnement continu pendant 7 années. Il faut toutefois préciser quelques informations.

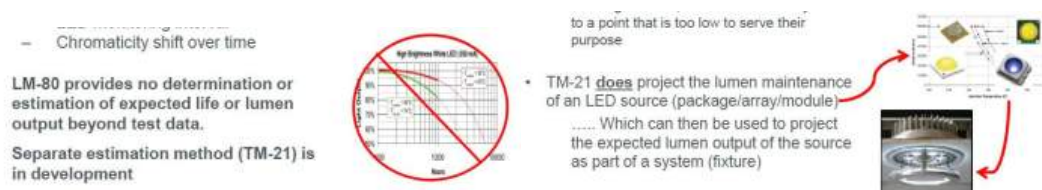
Usure des LED ou lumen maintenance. Dans les applications d'éclairage, la performance des LEDs décroît continuellement. Il y a donc les modes de défaillance dits « catastrophiques », le composant ne fonctionne plus (comme une source incandescente ou tube fluo, ou lampe à décharge) et les modes de défaut par pertes de performance.

On a coutume d'utiliser la durée de vie L70B50 qui suppose une performance de plus de 70% du flux initial (en lumen pour l'éclairage) et 50% des produits opérationnels.

A noter que pour les systèmes à LED, il y a en général plusieurs LEDs et qu'elles sont un élément d'un système. Il convient d'être prudent avec la notion de durée de vie des systèmes à LED.

Concernant leurs performances, les définitions de durée de vie sont normalisées par deux documents (/recommandations / normes) :

- LM-80 qui décrit la méthode de caractérisation sur 6,000 à 10,000 heures toutes les 1,000 heures, mais ne permet pas d'extrapolation, donc rien au-delà de la durée du test.
- TM-81 qui définit la méthode d'extrapolation jusqu'à 6×la durée du test, donc jusqu'à 60,000 heures. Bien sûr l'extrapolation peut donner des valeurs théoriques au-delà de cette limite (par 150,000 heures), mais elles ne sont pas normées.



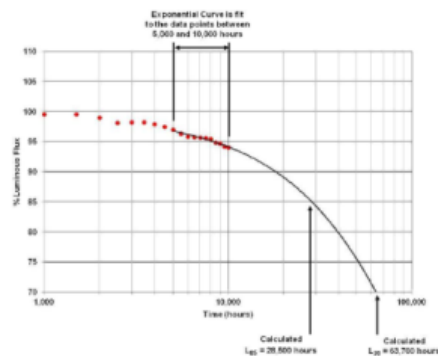


Figure 3: Example lumen maintenance lifetime at 10,000 hours

**Figure 48: Méthodes et normes d'évaluation des durées de vie des systèmes d'éclairage à LED.**

Le marché des LEDs est très mobile et changeant et il est difficile, voire impossible d'obtenir des retours d'expérience de plus de 10,000 heures. Les références changent plus souvent que cela.

Au LETI, nous étudions sur quelques références les mécanismes de défaillance des LEDs afin de mieux permettre une extrapolation des mesures faites en vieillissement accéléré.

Le principal moteur de dégradation des LED est la température de leur jonction. Plus elle est élevée et plus la durée de vie sera courte. C'est la raison pour laquelle le contrôle du montage et des conditions de fonctionnement sont essentiels.

La durabilité et l'efficacité énergétique des LED ne permettent cependant pas encore de définir simplement des solutions innovantes en signalisation horizontale où les coûts de mise en œuvre (alimentation) et de maintenance (interruption circulation) peuvent être importants. Il faut les associer à des technologies de production et de stockage d'énergie.

Cependant leur aspect électronique ou « digital » permet d'envisager des fonctionnalités nouvelles :

1. Le LiFi© ou communication par la lumière
2. A l'échelle d'un quartier ou d'une ville, le fonctionnement en réseau.

## 7.2 Synthèse LED

Le marché des LEDs, tirés par les applications éclairages s'est structuré et offre plusieurs types de LEDs. Cette application vise d'une part, et de manière quasi exclusive, les LEDs à base de GaN dont la longueur d'onde d'émission se situe vers 460 nm (couleur bleue), et d'autre part des composants de plus en plus puissance, capables de produire plus 100 taines voire milliers de lumen après conversion bleu→blanc par des luminophores.

Segmentation of High Brightness LEDs				
	Low Power LED	Medium Power LED	High Power LED	"Jumbo LED" and Multichip Array
<b>Spec.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Driving current: 5 to 20mA</li> <li>Bias voltage: 2.9 to 3.5V</li> <li>Power: &lt; 100mW</li> <li>Die size: small (200 to 360µm)</li> <li>Brightness: 5 to 12lm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Driving current: 50 to 150mA</li> <li>Bias voltage: 2.9 to 3.5V</li> <li>Power: &lt; 800mW</li> <li>Die size: medium (380 to 600µm)</li> <li>Brightness: 12 to 70lm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Driving current: &gt; 350mA</li> <li>Bias voltage: 2.9 to 3.5V</li> <li>Power: 1 to 3W</li> <li>Die size: large (600 to 1000µm)</li> <li>Brightness: 70 to 300lm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Driving current: &gt; 350mA</li> <li>Bias voltage: 3 to 3.5V</li> <li>Power: 3 to 200W</li> <li>Die surface: 4 to 100 mm<sup>2</sup> (arrays of small or large or "jumbo" die (&gt; 2mm<sup>2</sup>))</li> <li>Brightness: up to 20,000lm</li> </ul>
<b>Package style</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lamp style (through hole)</li> <li>SMD top &amp; side view (typically PLCC package)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SMD top &amp; side view (typically PLCC package)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Power package (typically ceramic substrates)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Power package (ceramic)</li> <li>Array / Module (ceramic or MC-PCB)</li> </ul>
<b>Application markets</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mobile phones, keypad lighting and LCD backlighting</li> <li>Small LCD Backlight</li> <li>Signs &amp; Large displays</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TV, monitor backlighting</li> <li>Automotive: dashboard, interior</li> <li>Large displays</li> <li>General lighting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Automotive DRL, front lamp, and signal</li> <li>Projection</li> <li>General Lighting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>General lighting</li> <li>Projection</li> <li>Automotive (front lamps)</li> </ul>
<b>ASP</b>	\$0.04 to \$0.15 / part	\$0.08 to \$0.45 / part	\$0.35 to \$1 / part	\$1.5 to \$200 / part

Très peu d'application de signalisation nécessitent une telle puissance, il s'agit plutôt de luminance dans la direction de l'observateur qui est spécifiée. Ce qui spécifie bien la norme de 2006 :

Éclairage du panneau (lx)	Luminance (cd/m <sup>2</sup> )			
	Minimum			Maximum
	L3	L2	L1	L1, L2, L3
40 000	12 400	6 200	3 100	62 000
10 000	12 400 (*)	—	—	—
4 000	2 200	1 100	550	11 000
400	600	300	150	3 000
40	250	200	100	1 250
≤ 4	75	60	30	375

D'autre part les couleurs sont très spécifiées et implique l'utilisation de LED monochromatiques. Le blanc se recoupe bien avec les applications d'éclairage.

	Coût	Maturité	Fiabilité	Energie	Réglementation
Sign. verticale	++	++	++	+	+
Sign. horizontale	-	+	+	--	?

On peut résumer selon le tableau ci-dessus le cas des LED pour la signalisation. En signalisation verticale, les composants efficaces et fiables sont disponibles (++ pour coût maturité et fiabilité). Les problématiques énergétiques sont à leur avantage, on trouve même des panneaux PMV autonomes. Par contre en signalisation horizontale, si les maturités technologiques sont là, la problématique de la distribution des sources lumineuses sur la voie de circulation et surtout de leur alimentation sont problématiques et un inconvénient important.

## 7.3 OLEDs

### 7.3.1 Etat de l'art de la signalétique

Jusqu'à présent la signalétique traditionnelle consistait en un panneau portant des motifs colorés translucides rétroéclairés par différents types de sources de lumière : lampes à incandescences, tube fluorescents, puis LED. Cette dernière technologie a été d'abord utilisée dans la signalétique bien avant l'engouement actuel pour les applications d'éclairage. En effet, elles ont rapidement été utilisées en rétroéclairage de boutons poussoirs ou directement dans des afficheurs. L'apparition de LED plus lumineuses a permis de ne plus rétroéclairer, mais d'éclairer les panneaux par la tranche en profitant de l'effet de guidage de la lumière dans des panneaux de PMMA, ce qui permet d'avoir une lumière plus homogène de panneaux minces que dans le cas d'un rétro éclairage.

### 7.3.2 Etat de l'art des OLED

Les OLED sont constituées de couches minces de semi-conducteurs organiques. En 1982, C.W. Tang<sup>6</sup> réalise le premier dispositif s'apparentant à une OLED : une monocouche organique entre deux électrodes émet de la lumière sous une tension d'alimentation de 20V. Les performances des dispositifs progressent ensuite régulièrement à la fois grâce à la mise au point de nouveaux matériaux, mais aussi grâce aux progrès enregistrés en maîtrise des procédés de dépôt et d'encapsulation. Ainsi les colorants fluorescents, puis phosphorescents font leur apparition dans les années 90 et le rendement lumineux des OLED augmente jusqu'à permettre une première commercialisation par Pioneer Corporation d'écrans d'affichage à base de matériaux organiques électroluminescents. Depuis la fin des années 90, la société Universal Display Corporation, une spin-off de l'Université de Princeton, a introduit et développé la

<sup>6</sup> C.W. TANG et al., Applied Physics Letters **51**, 913, Sept 1987

technologie des OLED phosphorescentes (PHOLED). Ces 5 dernières années, plusieurs équipes universitaires et industrielles ont annoncé des performances record pour les OLED :

- l'équipe d'Universal Display Corporation a annoncé récemment des dispositifs OLED à base de matériaux phosphorescents avec une durée de vie de 200 000 heures, pour une luminance initiale de 1000 cd/m<sup>2</sup> et un rendement de 30 lm/W ;
- la société Novald a également annoncé des dispositifs de 90 lm/W à 1000cd/m<sup>2</sup> ;
- OSRAM a commercialisé un module (ORBEOSTM) qui a une efficacité de 23 lm/W à 1000 cd/m<sup>2</sup> et une durée de vie de 5000 h pour une surface de 50 cm<sup>2</sup>.

A ce niveau de performances, les OLED sont adaptés à une variété d'applications allant des écrans jusqu'à l'éclairage. Depuis plusieurs mois, on assiste ainsi aux premières industrialisations de produits OLED à grande échelle. Cette première vague est principalement constituée d'écrans plats pour Smartphones de petite taille et tolérants à des coûts de fabrication élevés.

La seconde vague annoncée pour la fin de l'année 2013 sera constituée par des écrans plus grands pour la télévision ou les ordinateurs. Samsung, mais aussi LG, se positionnent comme premiers fournisseurs de tels produits OLED. Beaucoup de prototypes de ces objets ont été montrés lors de divers salons.

La troisième vague devrait être constituée par l'éclairage. Il existe plusieurs fournisseurs d'OLED européens issus de l'industrie de l'éclairage comme Osram ou Philips... Ces acteurs présentent sur le marché des modules standards d'OLED blanches et quelques modèles de luminaires. Leur atout réside dans leur réseau de commercialisation et leur positionnement sur le marché dans l'éclairage. Mais, en contrepartie, ils ne visent que les marchés standardisés de très forts volumes.

On cite ci-dessous quelques-unes des sociétés présentes sur ce marché avec leurs spécificités.

#### **Blackbody (F)**

Actuellement, le seul fabricant français produit des luminaires à base OLED sur substrat verre/ITO. La société couvre tous les aspects : de l'étude de conception à la production. Blackbody fabrique sept modèles de lampes OLED de bureau et un énorme lustre avec plus de 200 modules OLED. Chaque module fait 100 cm<sup>2</sup> et est vendu 440€.



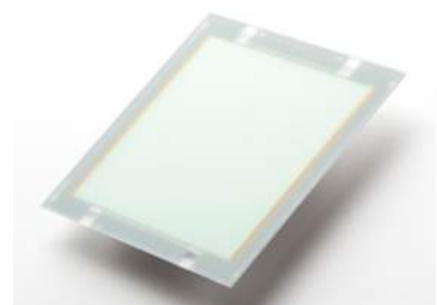
#### **Acuity Brands Kindred**

Acuity Brands, est un leader sur le marché nord-américain et l'un des principaux fournisseurs mondiaux de luminaires, éclairage et systèmes de contrôle avec un chiffre d'affaires 2010 de plus de 1,6 milliard \$. Ses produits OLED actuels sont fabriqués par LG Chem.



#### **Konica Minolta (J)**

KM est dans une phase de R&D sur les OLED pour l'éclairage. Ils ont annoncé un partenariat avec GE pour produire en 2011. Ils estiment que leur part de marché atteindra 1 milliard de dollars de C.A. sur l'éclairage OLED d'ici 2018. KM exploite une licence OLED de Universal Display. Leur premier prototype de 74mm×74mm, de 45lm/W à 1000cd/m<sup>2</sup> et de consommation de 71.5mA/3.6V est vendu à 1420€.



### **Lumiotec (J)**

Lumiotec est fondée en 2008 pour développer et produire des modules d'éclairages OLED. Lumiotec commercialise actuellement une lampe de bureau carrée de 14.5cm x 14.5cm de côté, avec une température de couleur de 4.900 K. Sa luminance maximale est de 2.700 cd/m<sup>2</sup> et consomme 9.5W. Cette lampe est proposée à 540€ pièce.



### **OSRAM Opto Semiconductors (D)**

L'Orbeos est un panneau de verre rond (diamètre 88mm) de 2.1 mm d'épaisseur et pèse 24g. Son efficacité est de 25lm/W. La luminance des panneaux est de 1000 cd/m<sup>2</sup> avec une consommation inférieure à un Watt. Leur durée de vie est d'environ 5000 heures. Ils sont disponibles sur le site internet d'OSRAM à 240€ pièce.



### **Liternity victory (D)**

C'est le premier modèle de lampe de bureau lancée par Novalled. Constituée de quatre panneaux OLED rectangulaires, cette lampe de 35cm de haut et 40cm de profondeur est vendue 4998€.



### **Verbatim (J)**

Verbatim est une sous division de Mitsubishi Chemical Corporation (MCC), la plus grande entreprise de chimie au Japon. Elle fabrique des panneaux pour l'éclairage OLED avec les matériaux de Mitsubishi. C'est le seul fournisseur à présenter une OLED modulable en couleur sur verre /ITO.



En parallèle aux petites molécules qui sont dans tous les produits OLED actuellement sur le marché, un autre type de semi-conducteur organique, le polymère conjugué, fait l'objet de recherches. Contrairement aux petites molécules, les polymères se présentent en général sous forme liquide. Ils sont déposés sur des substrats par plusieurs méthodes : dépôt par jet d'encre ou bien à la tournette. Les polymères sont mécaniquement robustes et souples, même si comme pour les petites molécules, leurs propriétés électroniques peuvent se dégrader lorsqu'ils sont exposés à l'oxygène ou l'eau.

Cette technologie des OLED à base de polymères a toutefois quelques années de moins que les petites molécules organiques en termes de maturité technologique. Les rendements sont ainsi 5 à 10 fois plus faibles.

En conclusion, on peut dire que, moins de 20 ans après la première OLED par Tang, les OLED deviennent une réalité commerciale au niveau de l'affichage. La prochaine étape consiste à ouvrir la voie aux OLED pour des applications dans la signalétique et l'éclairage.

#### **7.3.2.1 Etat de l'art de l'encapsulation pour OLED**

Les molécules actives dans les OLEDs sont très réactives et les dispositifs doivent être encapsulés. Celle-ci présente encore une problématique pour des produits, notamment en environnement difficile comme l'extérieur ou les axes de circulation.

L'état de l'art de l'encapsulation d'OLED par couches minces barrière met en avant une approche UHB<sup>7</sup> caractérisée par la construction d'une architecture d'encapsulation dite « hybride » utilisant une alternance de couches inorganique/organique/inorganique/..., n fois. Ainsi, le produit Barix<sup>TM</sup> commercialisé par la société Vitex permet de corriger la chute de performance barrière d'une couche Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> unique (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PVD pour le Barix<sup>TM</sup>) - due à la présence de défauts inévitables dans les couches inorganiques - en allongeant le chemin de diffusion des espèces oxydantes comme O<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>O jusqu'au dispositif sensible<sup>8</sup>. Certains travaux récents ont montré la capacité UHB exceptionnelle de dépôts de films d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> déposés par ALD sur des films de PEN. Les valeurs calculées de WVTR étaient aussi faibles que 1.7 10<sup>-5</sup> g/m<sup>2</sup>/jour pour un film de 25 nm. Cette technologie permet donc de s'affranchir de l'utilisation d'empilements multicouches. Toutefois cette solution n'est valable que si les surfaces à recouvrir sont totalement propres, c'est-à-dire en l'absence de particules contaminantes pouvant générer des défauts dans la couche, ce qui implique un travail en salle blanche. Concernant les matériaux à déposer pour ces applications barrières, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se révèle un candidat de choix puisque le procédé ALD TMA/H<sub>2</sub>O menant à l'oxyde est un procédé « cas d'école », présentant une fenêtre de réalisation extrêmement large notamment en température. L'alumine présente toutefois l'inconvénient de s'hydrolyser lors de tests en température et humidité élevées, ses qualités barrières pouvant alors évoluer et se dégrader<sup>9</sup>. Une alternative récente consiste à utiliser de l'oxyde de titane TiO<sub>2</sub> qui se révèle extrêmement stable tout en présentant des qualités barrières de grade UHB<sup>10</sup>.

### 7.3.3 Vers la signalétique

La signalétique OLED suscite un intérêt croissant du monde industriel par son fort potentiel technique. Elle offre en effet de nouvelles possibilités en termes de fonctionnalités :

- Les dispositifs peuvent être ultra minces (moins de 2mm d'épaisseur), souples et/ou conformables ;
- Toutes les formes de dispositifs sont imaginables (triangulaire, circulaire...) ;
- Plusieurs symboles peuvent être affichés sur un seul et même composant, activés indépendamment.

Des OLED sur substrats métalliques et plastiques existent déjà à l'échelle de prototypes (General Electric travaille notamment sur des OLED sur plastique découpables). La technologie OLED est par ailleurs maîtrisée au CEA-LETI et des développements jusqu'à l'échelle préindustrielle ont été réalisés en partenariat avec la start-up MicroOLED. Le CEA-LETI a également collaboré dans le cadre de projets européens (COMBOLED) sur la thématique de l'éclairage OLED où des développements ont pu être réalisés notamment sur l'encapsulation.

Visant à terme des applications où le prix des produits sera un facteur déterminant pour son déploiement commercial, la problématique est d'assembler dans un même procédé des solutions potentiellement « Low Cost ».

A notre connaissance, aucun projet techniquement proche n'a fait l'objet d'un financement national ou européen chez les partenaires du projet.

### 7.3.4 Verrous technologiques

Les verrous technologiques à lever sont les suivants :

**Dépôt de structures OLED fonctionnelles sur substrat de type PCB** : un circuit PCB a habituellement une surface qui le rend peu compatible à son usage comme substrat d'OLED vu sa rugosité et les propriétés électriques du conducteur habituellement utilisé, à savoir le cuivre.

<sup>7</sup> UHB : Ultra High Barrier

<sup>8</sup> P. E. Burrows, L. G. Graff, M. E. Gross, P. M. Martin, M. K. Shi, M. Hall, E. Mast, C. Bonham, W. Bennett, M. B. Sullivan, *Displays* 22 (2001) 65

<sup>9</sup> P. F. Garcia, R. S. McLean, M. H. Reilly *Appl. Phys. Lett.* 97 (2010) 221901

<sup>10</sup> W. A. Barrow, E. R. Dickey *54th Annual Technical Conference Proceedings, Soc. Vac. Coat.* (2011) 402-406



**Affichage sur un seul dispositif de plusieurs motifs de formes et de couleurs différentes :** des solutions astucieuses sur le dessin de l'adressage électronique et sur les procédés technologiques associés devront être mises en œuvre pour adresser cette problématique à bas coût, l'idée étant de ne pas rentrer dans la complexité (et le coût) d'un écran.

**Encapsulation couche mince mécaniquement robuste et qualification vis-à-vis des conditions d'utilisation :** il faudra adapter les procédés maîtrisés actuellement, entre autre par le CEA-LETI, aux spécificités de l'application et améliorer encore la robustesse mécanique de l'encapsulation en couche mince qu'il a développé. L'enjeu est de conserver l'extrême finesse permise par les OLED tout en ajoutant une fonctionnalité de robustesse mécanique.

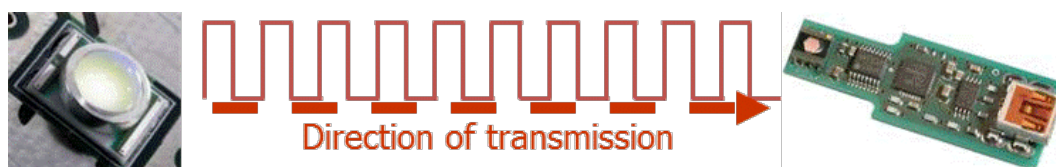
**Montrer la faisabilité d'OLED sur PCB en présence de composants électroniques classiques (PCBA) :** dans bon nombre d'applications, la solution la plus attractive serait de passer à la fabrication de l'OLED en fin de procédé, c'est-à-dire sur des PCB sur lesquels les composants électroniques auraient déjà été montés. Cette approche demande à mettre au point un process industriel rigoureux notamment en termes de propreté des substrats après le montage des circuits et de qualité de surface.

OLED	Coût	Maturité	Fiabilité	Energie	Réglementation
Sign. vertical	--	--	0	+	?

Les technologies OLED sont prometteuses mais restent à un état de maturité peu avancés pour l'application ADVICE. La conséquence en est un coût important (--) et une fiabilité à démontrer en environnement agressif. Les performances énergétiques sont proches des LEDs et seront au niveau des LEDs lorsque leur maturité technologique atteindra le niveau industriel.

## 7.4 Communication par la lumière ou vlc

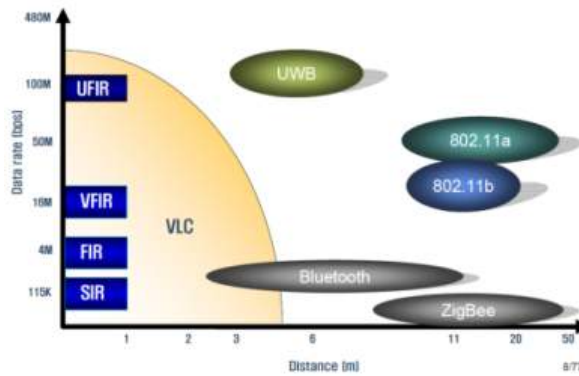
Les LED sont des sources qui peuvent être commutée (on/off) à des fréquences très élevées, supérieures au méga hertz (>1 MHz). A ces fréquences, le clignotement n'est pas perceptible par l'œil humain (ni animal) qui n'est sensible qu'à la moyenne temporelle. C'est d'ailleurs ainsi que sont régulée en intensité bon nombres de lampes à LED par la technique dites PWM (Pulse Width Modulation).



**Figure 49: Principe de communication par la lumière. Les fréquences accessibles permettent de ne pas créer de gêne visuelle.**

Il est donc possible d'utiliser la source LED pour transmettre des données à un photo détecteur rapide. Cette technique est parfois dénommée VLC pour Visible Light Communication. Des normes commencent à décrire des protocoles de communication par ce vecteur, comme le LiFi© par exemple.

L'institut Fraunhofer a démontré la faisabilité d'une transmission à 800 Mbps (méga bits par seconde) avec une lampe à 3 canaux RVB.



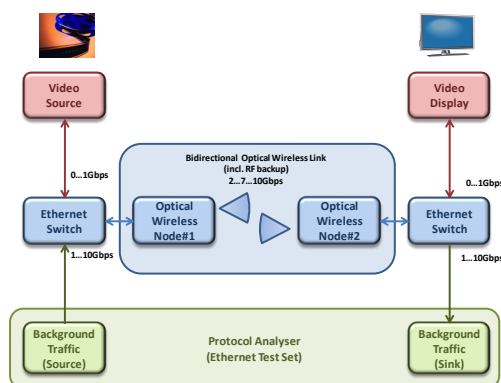
**Figure 50: Positionnement possible des technologies VLC par rapport aux technologies RF.**

Le LiFi présente des caractéristiques qui le différencient des technologies radiofréquences :

- Il ne nécessite pas d'allocation de spectre,
- est insensible aux perturbations RF,
- peut être déployé dans un environnement sensible aux émissions RF (hôpital, avion, ....),
- peut être directif et sélectif par des moyens optiques
- A priori sans danger pour les personnes.

Le LiFi doit cependant être associé à un récepteur qui sera soit sur l'infrastructure, soit sur les véhicules, soit sur les deux pour des communications

- Véhicule à véhicules : rétro propagation d'une onde de freinage par les feux stop par exemple, comme il est d'usage de le faire manuellement avec des feux de détresse)
- Infra à infra
- Véhicule à Infra : détection de véhicule autorisé par les feux avant.
- Infra à véhicule : transmission par les feux tricolores d'info de synchronisation ou de cartographie aux véhicules en attente (start and go, véhicules hybrides, état des autres feux, délai....)



**Figure 51: Schéma bloc d'une communication optique par l'éclairage.**

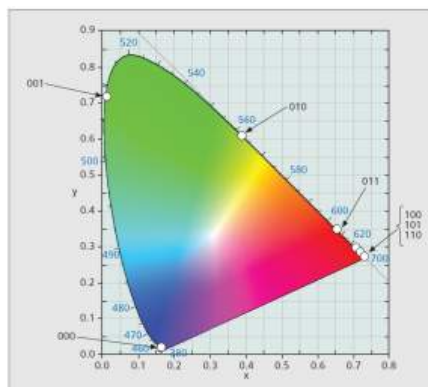
Le coût de mise en œuvre du Lifi dans chaque véhicule et la nécessité que « l'autre » soit équipé pour établir une communication est un frein important à son déploiement. D'autant plus que si les LEDs sont présentes tant sur l'infrastructure que sur les véhicules, les récepteurs optiques compatibles en sont absents à ce jour.

On trouve quelques prototypes de communication Lifi.

- Le LETI par exemple a fait une démonstration de lien vidéo HD unidirectionnel entre un luminaire et un récepteur,
- L'institut Fraunhofer [HHI](#) à Berlin propose des modules bidirectionnels directs. Il n'y a pas de fonctionnalité d'éclairage ni de signalisation associée.



On trouve également quelques entreprises qui se positionnent sur la communication par la lumière visible (VLC ou « LiFi »). Par exemple [Oledcomm](#) et [Luciom](#) en France. Les maturités technologiques sont très faibles, notamment dans un environnement extérieur. De manière générale, les portées restent de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Une norme est en cours d'élaboration pour le Lifi, il s'agit de la 802.15.7. Notamment soutenue par Samsung, Intel, ETRI (IEEE Communications Magazine • March 2012, IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support). Elle se base sur l'utilisation de 7 couleurs, visibles sur le graphe ci-dessous:



	Coût	Maturité	Fiabilité	Energie	Réglementation
LiFi	-	--	0	0	?

Le Lifi est une des fonctionnalités originales que pourrait apporter les LED à la signalisation dynamique en permettant une communication d'information essentielle au fonctionnement dynamique des voies de circulation. Le surcoût tient essentiellement dans le déploiement de récepteur optique nouveau. A priori l'impact énergétique est nul sur une fonction d'éclairage. En tout cas le couplage de ces deux fonctions n'additionne pas les consommations des deux fonctions prises isolément (éclairage et réseau antenne GPRS par ex). Elle permettrait aussi de soulager la disponibilité des bandes radio pour les autres modes de communication, bien que le niveau de débit d'information requis pour un usage de circulation soit certainement faible.

## 7.5 Les LEDs en réseau

Pour bénéficier de tous les avantages des LED il est utile d'associer les luminaires à des capteurs. La ville de Chattanooga, Tennessee, USA, a déployé l'ensemble de son éclairage public avec des luminaires en réseau. Chaque point lumineux devient un élément unique d'un réseau et peut être contrôlé à distance.



**Figure 52: L'éclairage électronique travaille en coopération avec de nombreux senseurs et actuateurs. Source Ville de Chattanooga, LEDs2012 San Diego.**

Un des usages qui en découle est l'utilisation des luminaires, par secteur, par les forces de police pour signaler des lieux des appels 911 aux équipes qui s'y rendent. Une autre application qui en découle est le guidage des automobilistes lors des alertes tornades (baisse de luminosité importante et utilisation nécessaire de l'éclairage public) par des illuminations spécifiques des itinéraires d'évacuation.



**Figure 53: Géolocalisation des luminaires sur une application déportée permettant de faire de la gestion d'éclairage et d'envisager de l'allocation dynamique d'itinéraires (ici en cas de tornade).**  
 Source Ville de Chattanooga, LEDs2012 San Diego.

Il s'agit d'une allocation dynamique d'itinéraire en quelque sorte. Cela s'apparente plus à la signalisation verticale qui concentre en un nombre limité de lieux des fonctionnalités comme l'alimentation en énergie, l'affichage d'information, la communication avec l'infrastructure ou l'exploitant de l'infrastructure.

## 7.6 Conclusion technologies pour la signalisation

	Coût	Maturité	Fiabilité	Energie	Réglementation
LED					
Sign. verticale	++	++	++	+	+
Sign. horizontale	-	+	+	--	?
OLED					
Sign. verticale	--	--	0	+	?
LiFi	-	--	0	0	?

D'un point de vue général, la signalisation horizontale pose un problème de distribution des sources lumineuses et d'alimentation en énergie. Nous n'avons pas identifié de solution autonome distribuées et matures.

La signalisation verticale exploite largement des technologies matures de LEDs, dont celles tirées par les applications éclairage. L'évolution est sans doute plus à la diversification ou l'augmentation des informations signalées, comme plus de détails conduisant à un afficheur de type « display » ou encore à des fonctionnalités de communications optiques. Mais ces dernières ne sont pas encore matures et n'ont pas trouvés leur modèle de fonctionnement pour un usage d'allocation dynamique de voies de circulation.

### 8.1 Prise en compte de l'utilisateur dans la conception du système ADVICE

Auteurs : Myriam Hugot, Fabien Moreau, Hélène Tattegrain

L'objectif de cette tâche est de prendre en compte l'utilisateur dans la conception de cette nouvelle gestion du trafic par l'allocation dynamique de voie pour les transports publics.

Nous nous sommes focalisés dans un premier temps sur la compréhension par les autres usagers du nouveau mode de fonctionnement qui ne connaissent pas le système. En effet, le système Advice ne va pas impacter uniquement ses utilisateurs mais l'ensemble des usagers qui doivent se partager la voirie. Pour concevoir la signalisation verticale et horizontale indiquant le mode de partage de la voirie, il est donc important de concevoir une signalisation intuitive c'est-à-dire dont la lisibilité et la compréhension est comprise par tous les usagers. Pour cela un questionnaire a été créé et testé sur un échantillon d'utilisateurs par une enquête web.

Un deuxième problème est l'introduction de ce type de système dans l'activité de conduite. En effet, la conduite est une activité très complexe et contrainte temporellement. Le conducteur ne conduit pas en tenant compte de l'ensemble de la situation de conduite mais sur une représentation qu'il se fait de cette situation. Pour cela, il sélectionne dans la scène réelle les informations qu'il estime pertinentes pour réaliser sa tâche de conduite. Cette sélection se fait en fonction de ses connaissances sur la conduite basées sur son expérience qui lui a permis de se construire des modes opératoires. L'introduction d'un système Advice peut remettre en cause une partie de ces modes et donc il est important de voir si les usagers sont capables de comprendre le mode de partage de la voirie mais aussi d'intégrer cette compréhension de la situation dans son activité de conduite c'est-à-dire de réaliser les actions permettant une conduite sécuritaire. Il sera aussi important de tester la réactivité des usagers lors des changements de modes de fonctionnement du système. Cette deuxième étape sur l'utilisabilité du système n'a pas été réalisée dans ce projet faute de temps mais pourra être réalisée dans un deuxième projet par la mise en place d'une expérimentation sur simulateur de conduite. Cette partie du livrable va donc se découper en deux parties. La première va se focaliser sur la partie compréhension et lisibilité de la signalisation. La deuxième présentera sur la test de l'utilisabilité du système Advice et de ses changements de modes dans le cadre de la conduite contrainte temporellement dans des situations plus au moins critiques.

### 8.2 Compréhension et lisibilité de la signalisation

Les situations d'allocations dynamiques de voies réservées à la circulation des bus existent déjà dans certaines villes mais aucune signalisation propre à cette situation n'existe à ce jour dans le code de la route. Ce questionnaire a été conçu pour appréhender la compréhension de la signalisation de ces situations nouvelles à partir de panneaux déjà existants, combinés ou adaptés par quelques transformations, ajouts de textes ou de logos. La signalisation verticale en ville peut être couplée ou non par une signalisation horizontale. Plusieurs types de signalisations sont donc testées, combinées ou pas.

#### 8.2.1 Description questionnaire

Le questionnaire est composé de deux parties (voir annexe II). La première présente des panneaux de signalisation en situation, insérées dans des photographies. Il peut y avoir un seul ou plusieurs signalisations sur une même photo. La prise de vue représente le point de vue du conducteur assis au volant de sa voiture. Il s'agit pour lui d'appréhender correctement la situation et de répondre à deux questions, les mêmes pour chaque photo :



**Figure 54 : Exemple de situation utilisée dans le questionnaire**

- A partir de maintenant, ai-je le droit de rouler sur la voie située à ma droite?
- Dans 50m, aurai-je le droit de rouler sur la voie située à ma droite?

Les réponses possibles à ces deux questions sont : oui/non/je ne sais pas. Les questions sont posées dans quatre situations différentes :

- Situation1 : Une voie de circulation des voitures est réservée à la circulation des bus.
- Situation2 : La voie de circulation dédiée aux bus s'ouvre à la circulation des voitures.
- Situation3 : Sur autoroute, la voie de droite est réservée à la circulation des bus.
- Situation4 : Sur autoroute, la bande d'arrêt d'urgence s'ouvre à la circulation des voitures.

Pour chaque situation, les répondants vont devoir se prononcer sur six photos différentes, représentant des ouvertures ou des fermetures de voies avec une signalisation en amont ou au moment du changement, cette signalisation pouvant être uniquement verticale (panneau sur la droite de la voie) ou couplée avec une signalisation horizontale (marquage par des LEDs sur la ligne démarquant les deux voies).

Les photos présentées sur le questionnaire ont été fabriquées par photomontage sur le logiciel PhotoShop à partir de prises de vues issues de Google Street Views. Les panneaux créés pour le besoin de l'étude ont été insérés à la place de panneaux déjà existants.

Comme il s'est avéré trop long de tester toutes les combinaisons dans un même questionnaire, 4 versions différentes de questionnaires ont été créées pour cette première partie (voir annexe III). Le sujet se voit attribué une des quatre versions du questionnaire selon son mois de naissance (les sujets nés en Janvier, Avril, ou Septembre répondent à la première version, ceux nés en Février, Mai ou Octobre répondent à la deuxième version...).

Chaque sujet voit 6 photos dans chacune des 4 situations appréhendées mais ils ne se prononcent donc pas tous sur les mêmes panneaux. Les situations d'ouverture et de fermeture des voies sont contrebalancées (3 ouvertures, 3 fermetures), l'ordre de présentation des photos d'ouverture/fermeture des voies étant différent pour chaque situation, dans chacune des 4 versions de questionnaires. Dans la mesure du possible, ils voient autant de situations à double signalisation (verticale et/ou horizontale) qu'à simple signalisation. Nous avons fait attention à ce qu'une situation qu'un panneau présenté seul soit toujours vue avant une situation avec ce même panneau couplé avec des plots lumineux au sol.

Dans la deuxième partie du questionnaire, 10 panneaux, précédemment rencontrés dans les situations de la première partie, sont présentés indépendamment de tout contexte. Les panneaux sont présentés selon 12 ordres différents, l'affectation se faisant à partir du mois de naissance du répondant.

Seule une phrase précise l'environnement dans lequel le conducteur serait susceptible de rencontrer ce panneau : La compréhensibilité des panneaux est appréhendée à travers quatre questions. Dans la première, il est demandé de définir si ce panneau autorise ou pas la circulation des voitures et/ou celle des bus sur la voie que le panneau caractérise. Les deux questions suivantes sont des échelles d'accord en 5 points (de pas du tout d'accord à tout à fait d'accord), destinées à moduler leur jugement sur les affirmations suivantes :



**Figure 55 : Exemple de panneau**

- Ce panneau est facilement lisible
- Ce panneau est facilement compréhensible.

Enfin, les répondants ont la possibilité de préciser leur point de vue et leurs commentaires dans une dernière question ouverte.

### **8.2.2 Composition de l'échantillon :**

Le questionnaire est resté en ligne 6 semaines du 2 Aout au 15 septembre 2013. Nous avons enregistré 187 réponses complètes au questionnaire plus 57 réponses qui incomplètes ont été écartées de l'analyse.

L'échantillon est composé à 67% d'hommes. Le département 69 est le plus représenté (près de 70% des répondants, plus de 80% si on ajoute les départements limitrophes : Ain, Isère). La moyenne d'âge de l'échantillon est de 42 ans, la médiane 41. 25% ont entre 22 et 33 ans, 25% entre 48 et 76 ans.

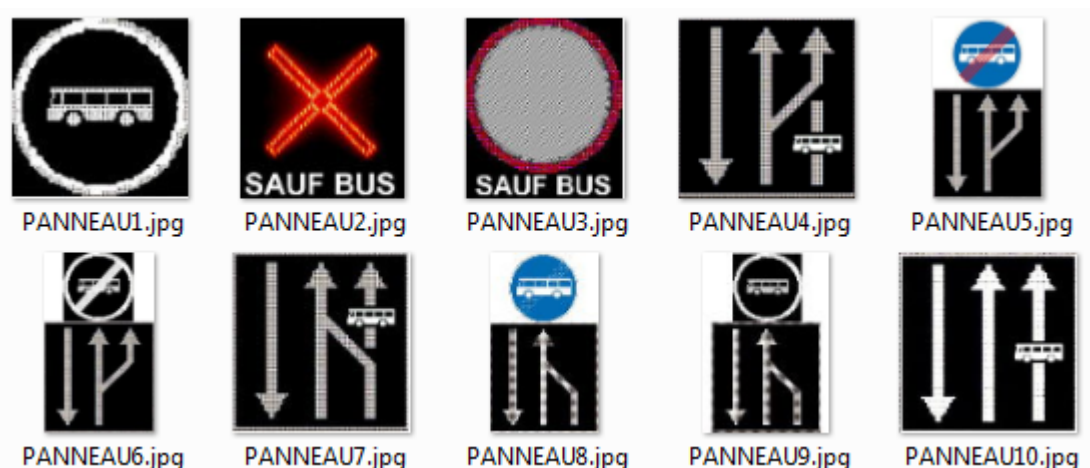
75% des répondants sont issus des cadres, 12% des employés. La moitié de l'échantillon réside pour moitié dans des agglomérations comptant entre 200000 et 2millions d'habitants le quart dans les communes rurales. Les répondants sont donc pour la plupart coutumiers des déplacements en centre-ville. Plus de deux tiers (64%) des sujets déclarent conduire en centre-ville au milieu des bus plus de 10 fois par mois. Seuls 5% déclarent le faire moins d'une fois par mois.

Ils sont aussi habitués à rouler sur l'autoroute. 58% le font plus de 10 fois par mois, seuls 5% empruntent les autoroutes moins d'une fois par mois.

### **8.2.3 Compréhension des panneaux en dehors de tout contexte**

Les sujets avaient à se prononcer sur 10 panneaux différents.





**Figure 56 : Ensemble des différents panneaux testés**

Les trois premiers panneaux se retrouvent principalement au-dessus des voies d'autoroute, excepté le premier que certains répondants ont pu découvrir en ville, lorsqu'une voie de circulation normale devenait réservée aux bus. La phrase d'introduction donnée aux sujets était donc la suivante. « Voici un panneau susceptible d'être rencontré au-dessus d'une voie d'autoroute. ». Les 6 panneaux suivants indiquent un changement : 3 panneaux pour signaler la fin d'une voie réservée aux bus, 3 autres pour signaler l'ouverture d'une voie réservée aux bus. Le dernier panneau rappelle la situation existante : la voie la plus à droite est réservée aux bus. Pour ces panneaux (4 à 10), la phrase introductive était légèrement différente : « Voici un panneau à message variable susceptible d'être présent sur le bord de la route, en ville ou sur autoroute » car ils se rencontrent exclusivement, sur la bordure de la voie, en centre-ville ou contexte autoroutier.

La première question demandait de définir si le panneau autorisait ou pas la circulation des voitures sur la voie la plus à droite ou sous le panneau selon la situation. Une deuxième question concernait la circulation des bus. Deux autres questions étaient des questions sur la lisibilité et le caractère compréhensible des panneaux avec des réponses dans des échelles d'accord en 5 points (plus le panneau est lisible et compréhensible, plus la note s'approche de 5).

Le Tableau 24 récapitule ces résultats. Pour mesurer la compréhension des panneaux, trois variables ont été créées pour calculer le taux de bonnes réponses. Une première variable, « %vrai voit. » mesure la bonne réponse quant aux droits de circulation des voitures, une deuxième, « %vrai bus » mesure la même chose pour les bus. La troisième variable, « bonne rép » étant l'intersection des deux premières, c'est-à-dire qu'il faut avoir répondu bon à la question sur la circulation des voitures ET celle des bus pour que la réponse soit comptée comme bonne pour le panneau.

#### 8.2.3.1 Panneau 1 : rond bus noir

Ce premier panneau « Rond Bus Noir », bien qu'assez bien perçu en terme de lisibilité ( $M=3,5$ ,  $EC=1,3$ ), n'est pas perçu comme facilement compréhensible ( $M=2,9$  ;  $EC=1,4$ ). Le taux de bonnes réponses globales de 70% est inférieur au taux de bonnes réponses sur la circulation des voitures (85,1%) et sur celui des bus (80%), suggérant que des personnes ont pu répondre correctement pour les voitures et pas pour les bus, et inversement.

Il ressort de l'analyse des commentaires que la couleur noire est mal perçue, les sujets hésitants sur sa signification, ne sachant dire si le panneau indique, pour les bus, une obligation ou une interdiction de circuler sur la voie. 3 commentaires posent la question de l'autorisation de circuler pour les voitures alors que du point de vue des bus, le panneau est perçu comme une obligation. La caractéristique « voie réservée aux bus » n'est pas comprise.

#### 8.2.3.2 Panneau 2 : croix






La Croix est à la fois le panneau définit comme le plus lisible ( $M=4,2$   $EC=0,9$ ) et le plus compréhensible ( $M=4,2$   $EC=0,9$ ). Comme prévu, il marque un très fort taux de bonnes réponses 95,4%. Les commentaires portent essentiellement sur la taille des caractères qui ne seront donc pas lisibles de loin. Des craintes sont formulées quant à la compréhension du texte en français par les étrangers de passage en France.

#### 8.2.3.3 Panneau 3 : B0

Le panneau B0 a une place intermédiaire entre les deux premiers (la croix et le rond bus noir). S'il est perçu comme relativement bien lisible ( $M=3,9$   $EC=1$ ), exceptions faites dans les commentaires des mêmes réflexions sur la taille et la langue du texte), il est aussi relativement perçu comme compréhensible ( $M=3,8$   $EC=1,1$ ). Le taux de bonnes réponses est bien plus proche que celui de la croix que du panneau « rond noir bus » (95,4% de bonnes réponses). Les commentaires indiquent que le texte aide à la compréhension du panneau.

#### 8.2.3.4 Panneau 4 : Fin de voie réservée aux bus, bus incrusté

Ce panneau est perçu comme lisible ( $M=3,8$   $EC=1$ ) et compréhensible ( $M=3,8$   $EC=1$ ) alors que l'analyse des taux de bonnes réponses ainsi que les commentaires montrent que le panneau n'a pas été compris. Moins de 50% des répondants ont pu donner des réponses adéquates à la fois sur la circulation des voitures et celle des bus. S'il est relativement clair pour la plupart des répondants (90,9%) que les voitures peuvent circuler sur la voie, le message à propos des bus n'est pas clair. Les commentaires indiquent que pour certaines personnes le bus ne peut plus continuer sur la voie.

Num	Image	Tableaux	Lisible		Compréhensible		%bonne rep	%vrai voit.	%vrai bus	%JNSP
			Moy.	E.C.	Moy.	E.C.				
1		Rond Bus Noir	3,5	1,28	2,9	1,4	70,3	85,1	80,0	14,9
2		Croix	4,2	0,9	4,2	0,9	96,0	98,3	96,6	2,3
3		BO	3,9	1	3,8	1,1	95,4	98,9	95,4	3,4
4		Fin Voie Réservée - Bus incrusté	3,8	1	3,8	1	49,7	90,9	56,0	2,9
5		Fin Voie Réservée - Rond Bleu	2,9	1,3	2,4	1,2	30,3	72,6	34,3	25,1
6		Fin Voie Réservée - Rond Noir	2,7	1,3	2,3	1,2	25,7	64,0	32,0	32,6
7		Début Voie Réservée - Bus incrusté	3,8	1,05	3,77	1,1	89,7	92,0	94,9	2,3
8		Début Voie Réservée - Rond Bleu	2,4	1,3	1,8	1,1	21,1	80,0	34,3	58,9
9		Début Voie Réservée - Rond Noir	2,5	1,4	1,7	1,1	30,3	88,6	36,6	58,9
10		Pdt Voie Réservée - Bus incrusté	4	1	3,8	1,1	86,9	90,9	93,7	4,0

**Tableau 24 : résultats des réponses avec les panneaux présentés seuls**

#### 8.2.3.5 Panneau 5 : Fin de voie réservée aux bus, rond bleu

Ce panneau cumule les difficultés par rapport au précédent. Il est perçu comme beaucoup moins lisible ( $M=2,9$   $EC=1,3$ ) et moins compréhensible ( $M=2,4$   $EC=1,2$ ). Le quart des répondants déclare spontanément ne pas savoir répondre ( $M=25,1$ ). Seuls 30,3% des sujets ont réussi à répondre correctement sur la circulation des voitures et des bus. Ce n'est pas seulement la compréhension liée à la circulation des bus qui est faible (34,3% de bonnes réponses sur les bus), le panneau perturbe aussi la compréhension de la circulation des voitures (72,6% de bonnes réponses contre 90,9% sur le panneau précédent).

Les commentaires sont nombreux (33). Le premier item qui revient est la charge d'informations trop lourdes contenue dans le panneau. Le panneau bleu barré de rouge est source de confusion : 4 personnes écrivent que le bleu est synonyme d'obligation, le rouge d'interdiction et ne savent pas comment interpréter ce panneau. Les personnes ne comprennent pas non plus à quelle voie est censé s'appliquer le panneau bleu du dessus. Le dessin est perçu comme signalant un élargissement de voie.

Une autre source de perturbation est le manque de continuité de la voie la plus à droite. Le panneau indique une voie qui s'ouvre. Certaines personnes (4) s'interrogent pour savoir si le panneau est à destination des bus ou des voitures.



#### 8.2.3.6 Panneau 6 : Fin de voie réservée aux bus, rond noir

C'est le panneau le plus mal noté et mal compris des trois possibilités présentées aux sujets pour signaler la fin de voie réservée aux bus. Il cumule les difficultés de compréhension du panneau rond noir bus avec celles du panneau précédent. La note de lisibilité des très faible ( $M=2,7$   $EC=1,3$ ) ainsi que celle de compréhension (2,3). Seuls un quart des personnes ont bien répondu (25,7% de bonnes réponses), près d'un tiers répondent spontanément ne pas comprendre (32,7% de « Je ne sais pas »).

Les commentaires sont nombreux (21). Ils portent sur la couleur noire entourant le bus, les sujets exprimant leur confusion pour déterminer si la circulation est interdite aux bus ou pas. On retrouve des interrogations sur la destination des informations du panneau : est-ce à destination exclusive des bus ou les voitures sont-elles aussi concernées ?

#### 8.2.3.7 Panneau 7 : Début de voie réservée aux bus, bus incrusté

Ce panneau bénéficie à la fois d'une bonne note de lisibilité ( $M=3,8$   $EC=1$ ) et de compréhensibilité ( $M=3,8$   $EC=1,1$ ). Près de 90% des sujets ont bien répondu à la fois sur la circulation des voitures et celle des bus. Seulement 2,3% des répondants déclarent ne pas le comprendre.

#### 8.2.3.8 Panneau 8 : Début de voie réservée aux bus, rond bleu

La note de lisibilité de ce panneau est la plus faible des 10 panneaux présentés ( $M=2,4$   $EC=1,3$ ). La note de compréhensibilité est aussi très faible ( $M=1,8$   $EC=1,1$ ). Seuls 21,1% des sujets ont réussi à répondre correctement sur la circulation des voitures et des bus. Ce panneau n'est clairement pas compris.

Les 31 commentaires font apparaître une incompréhension sur le nombre de voies disponibles pour la circulation. Le rabattement destiné aux voitures étant perçu comme une fin de voie pour tous les véhicules. Du coup, beaucoup comprennent que les deux voies ne deviennent qu'une. Pour certains, la voie restante est une voie obligatoire pour les bus et qu'il n'y a plus de voie disponible pour la circulation des voitures, pour d'autres, c'est une voie pour tous les véhicules.

#### 8.2.3.9 Panneau 9 : Début de voie réservée au bus, rond noir

Les résultats pour ce panneau sont très similaires au précédent. On note une très faible lisibilité ( $M=2,5$   $EC=1,4$ ) couplée à une très faible note de compréhensibilité ( $M=1,7$   $EC=1,1$ ). Seuls un tiers des sujets ont bien répondu sur la circulation des voitures et des bus.

Les commentaires sont prolixes (38). On retrouve beaucoup de remarques sur la complexité du panneau, sur la couleur ambiguë du noir quant au sens d'obligation ou d'interdiction pour les bus. Le panneau est là aussi compris comme un rétrécissement de voie, les voies de circulation passant de deux à une seule pour tous les véhicules.

#### 8.2.3.10 Panneau 10 : Voies simples, bus incrusté

Ce panneau ne présente pas un changement de situation mais un rappel de la situation présente où la voie la plus à droite est réservée à la circulation des bus.

La note de visibilité est très forte ( $M=4$   $EC=1$ ) ainsi que celle de compréhensibilité. Seuls 4% des sujets déclarent ne pas comprendre, 86,9% ont bien répondu aux questions sur la circulation des bus et des voitures.

La moitié des 21 commentaires laissent apparaître une interrogation sur le caractère exclusif de la voie réservée aux bus, les sujets se demandent si la voiture peut aussi l'emprunter.

Ces 10 panneaux isolés de leur environnement étaient présentés en deuxième partie de questionnaire. La première partie du questionnaire les présentait en situation. Les questions situations étant dispatchées sur quatre questionnaires différents, il est possible que certaines personnes n'aient pas vues l'ensemble de ces 10 panneaux en situation.

L'étude des panneaux présentés en dehors de tout contexte ne se suffit pas à elle-même car elle ne rend pas compte de la réelle visibilité du panneau dans son environnement. Dans la première partie du questionnaire, les quatre situations d'allocation dynamique des voies de bus

présentées avec différents panneaux permet de mettre en lumière la compréhension des panneaux dans leur environnement et de les comparer entre eux.

#### **8.2.4 Compréhension des panneaux en situations d'allocation dynamique des voies de bus**

Chaque photo de situation est présentée au moins une fois dans l'ensemble des 4 questionnaires, parfois deux. Si nous avons fait attention à ce qu'une photo représentant une seule signalisation unique soit toujours présentée avant une photo avec cette signalisation couplée avec une autre (marquage au sol par exemple), il peut arriver, qu'une photo d'une signalisation seule suive une photo d'une signalisation couplée par un marquage au sol mais pour une autre proposition de panneau. Pour deux photos présentant la même situation, l'une peut apparaître en début de liste dans un questionnaire, la deuxième en 5<sup>ème</sup> ou 6<sup>ème</sup> position dans l'autre. Pour une même photo, les résultats sont parfois très différents entre les deux questionnaires où la photo apparaissait dans un ordre différent. Nous avons donc fait le choix, dans un souci d'exhaustivité, de conserver les résultats détaillés des deux situations quand une photo est présentée deux fois, en plus de calculer la moyenne sur les deux situations (lignes grisées dans les tableaux).

Ces remarques nous ont conduits à faire le choix de ne pas mettre en œuvre de tests statistiques pour comparer les résultats des différentes signalisations. Les différences ne s'observant pas dans un contexte 'toutes choses égales par ailleurs', elles ne peuvent pas être imputées de façon certaine au seul changement de signalisation. Nous resterons donc sur une analyse descriptive des résultats.

Toutes les photos des situations sont consultables en annexes. La combinaison du numéro de situation couplée à la signalisation simple ou combinée permet de retrouver la photo en annexe. Les quatre environnements d'allocation dynamique de voie de circulation de bus sont consécutivement.

##### **8.2.4.1 Voie de circulation normale réservée aux bus**

Dans ces situations, les sujets sont dans un environnement composé de deux voies dans leur sens de circulation, la plus à droite pouvant être affectée temporairement à la circulation des bus. La signalisation peut indiquer deux changements: la voie devient réservée aux bus ou elle redevient accessible aux voitures, elle peut aussi être un rappel de la situation présente.



**Figure 57 : Situation routière : « Voie de circulation normale réservée aux bus »**

Le Tableau 25 résume les résultats de ce premier environnement de conduite, reprenant les différentes signalisations proposées, en mettant en regard les résultats avec une (S1) ou deux signalisations (S1+S2), (signalisation verticale pour S1, horizontale pour S2).

Les pourcentages calculés concernent le nombre de bonnes réponses quant à la circulation des voitures au point de vue de la photo (« à partir de maintenant » dans l'intitulé des questions,

traduit par « 0m » dans le tableau) et 50m après le point de vue de la photo. Les pourcentages S1 et S1+S2 marquent les bonnes réponses conjointes à ces deux questions.

Situation	O/F	Type	NbRep_S1	S1	%BonRep S1	%BonRep 0m_S1	%BonRep 50m_S1	%BonRep S1+S2	%BonRep 0m_S1+S2	%BonRep 50m_S1+S2	S2	Type	NbRep S1+S2
T1_1	F	Avt	50	rabattement bus	88	90	96	73,47	85,71	81,63	plots verts bus éteint	Avt	50
T1_1b	F	Avt	44	rabattement simple	70,45	86,36	84,09	88,64	93,18	95,45	plots verts bus éteint	Avt	44
T1_2	F	Chgt	44	rabattement bus	25	25	93,18	70,45	77,27	93,18	Plots rouges+bus allumé	Chgt	44
T1_2b	F	Chgt	50	rabattement simple+rond bus	20	22	56	61,22	75,51	79,59	Plots rouges+bus allumé	Chgt	49
T1_3	F	Pdt	50	voie bus	78	82	78	91,84	91,84	91,84	Plots rouges+bus allumé	Pdt	50
T1_3b	F	Pdt	44	rond bus	27,27	31,82	34,09	81,82	90,91	81,82	Plots rouges+bus allumé	Pdt	44
T1_4	O	Avt	93	adjonction bus	82,8	89,25	90,32	85,11	95,74	86,17	Plots rouges+bus allumé	Avt	94
T1_4	O	Avt	44	adjonction bus	81,82	88,64	90,91	88	100	88	Plots rouges+bus allumé	Avt	50
T1_4	O	Avt	49	adjonction bus	83,67	89,98	89,8	81,82	90,91	84,89	Plots rouges+bus allumé	Chgt	44
T1_5	O	Chgt	49	adjonction bus	26,53	32,65	87,76	60	64	82	plots verts bus éteint	Chgt	50
T1_5b	O	Chgt	44	adjonction simple	72,73	79,55	86,36	59,09	63,64	86,36	plots verts bus éteint	Pdt	44
T1_6	O	Pdt	93	voie simple	89,25	92,47	89,25	70,21	71,28	71,28	plots verts bus éteint	Pdt	94
T1_6	O	Pdt	44	voie simple	86,36	96,18	86,36	56	58	56	plots verts bus éteint	Pdt	50
T1_6	O	Pdt	49	voie simple	91,84	91,84	91,84	86,36	86,36	88,64	plots verts bus éteint	Pdt	44

**Tableau 25 : Voie normale de circulation réservée au bus**

#### **8.2.4.1.1 Signalisation indiquant la fermeture aux voitures d'une voie de circulation qui devient réservée aux bus.**

Le panneau de signalisation « rabattement bus » correspond au panneau numéroté 7 dans la partie précédente. Ce panneau est présenté aux sujets, 50m avant le changement (type=Avt dans le tableau), ou au moment du changement (type=Chgt) dans le tableau. On remarque des résultats très différents quand le panneau est présenté en amont du changement (88% de bonnes réponses), et au moment du changement (25%). L'analyse plus fine des deux questions montre que c'est sur la question des droits de circulations « à partir de maintenant » et non pas à 50m qui pose problème. En situation de changement, la formulation adoptée dans le questionnaire doit être certainement ambiguë pour certains sujets qui ne savent pas s'ils doivent répondre par à partir du point de vue du conducteur ou à partir du panneau quelques mètres plus loin comme nous l'imaginions. En tout état de cause, les résultats de circulation des voitures à 50m montrent que les sujets ont bien compris dans tous les cas qu'ils devaient se rabattre (96% de bonnes réponses quand le panneau est présenté 50m avant le changement, 93% au moment du changement).

Si l'on compare les deux signalisations rabattement avec bus intégré et rabattement simple (panneaux 7 et panneau 8 sans le rond bleu de la partie précédente), 50m avant le changement, la différence de taux de bonnes réponses, une entre les deux signalisations apparait ( 88% de bonnes réponses pour le panneau 7 rabattement avec bus incrusté, 70,45% pour celui qui montre un rabattement simple sans autre précision). Les questions ne portent que sur les droits de circulation des voitures et ne permettent donc pas de mettre en lumière la possible mauvaise interprétation comme un rétrécissement de voie vue dans l'analyse des résultats des commentaires du panneau 8. On retrouve toutefois que le panneau de rabattement avec le bus incrusté est le mieux compris.

Lorsque la situation est établie, que la voie la plus à droite est réservée aux bus, deux signalisations ont été comparées : le panneau 1 (Rond bus noir) et le panneau 10 (Voies avec bus incrusté). Dans la continuité des résultats sur l'analyse des panneaux hors environnement, on retrouve une nette différence entre ces deux panneaux, le panneau1 « rond bus noir » n'étant pas du tout compris (27,27% de bonnes réponses contre 78% pour l'autre).

#### **8.2.4.1.2 Signalisation indiquant l'ouverture à la circulation des voitures de la voie de bus**

On retrouve ici les mêmes écarts entre les résultats d'un même panneau présenté 50m avant ou au moment du changement, ce qui conforte l'hypothèse du problème de formulation de la première question. Le panneau adjonction de voies avec bus incrusté montre un taux de bonne réponses de 82,8% quand il est présenté 50m avant le changement, et seulement 26% au moment du changement.

Sans avoir de comparaison avec la situation du panneau présenté 50m avant le changement, on constate que le panneau représentant une adjonction de voie simple, sans bus ne posent

pas ce problème. Le taux de bonnes réponses est de 72,73%. Est-ce à dire qu'ils ont bien compris que c'était la fin de réservation de la voie aux bus et non pas une ouverture de voie supplémentaire, rien n'est moins sûr en se basant sur l'analyse des commentaires effectués sur les panneaux. Ils comprennent cependant bien mieux que les voitures peuvent emprunter la voie la plus à droite.

Quand la situation est installée, que les voitures peuvent rouler sur les deux voies, le panneau indiquant les flèches de circulation sans autre précisions marque sans surprise un fort taux de bonnes réponses (89,25%) puisqu'il correspond à la situation de circulation normale.

#### **8.2.4.1.3 Impact de la signalisation au sol**

Plus intéressante est l'analyse de l'impact de la signalisation au sol couplée avec les panneaux étudiés. Dans la situation de voies de circulation normales affectée temporairement à la circulation des bus, la signalisation au sol proposée est double : un bus marqué au sol (allumé ou éteint) vient compléter les plots lumineux verts ou rouges alignés sur le marquage délimitant les voies de circulation.

Contrairement à ce que nous imaginions, l'effet du marquage au sol est différent selon la couleur des plots. Si les plots rouges améliorent la compréhension de la signalisation, les plots verts couplés à la signalisation existante n'améliorent pas systématiquement la compréhension lorsque les voitures sont autorisées à circuler sur la voie de droite.

Si l'on compare les deux premières lignes du tableau (panneaux rabattement bus incrusté et rabattement seul), présentés tous les deux 50m avant le changement, en signalisation simple ou couplée avec la signalisation verticale, on remarque que le taux de bonnes réponses pour le panneau rabattement bus incrusté diminue, passant de 88% à 73,5% alors que pour le panneau rabattement simple, le taux de bonnes réponses augmente de 70,4% à 88,6%. Les plots verts ne permettent peut-être pas aux sujets de savoir plus clairement si la signalisation s'adresse aux voitures ou aux bus comme le laissaient entendre l'analyse des commentaires des panneaux.

Quand la voie de droite est interdite aux voitures, les plots rouges allumés au sol avec le marquage du bus permettent d'améliorer grandement la compréhension de la situation présentée avec les panneaux seuls. Citons seulement deux exemples : les panneaux présentés en situation de changements, rabattement avec bus incrusté et rabattement simple avec rond bus qui étaient mal compris (taux de bonnes réponses de 25 et 20%) voient le pourcentage de bonnes réponses croître de manière très forte (70,4 et 61,2%).

#### **8.2.4.2 Voie de circulation réservée aux bus ouverte à la circulation des voitures**

Dans cet environnement, les sujets se trouvent au volant de leur voiture en ville. La voie à droite de leur voie de circulation est un couloir de bus qui va de façon temporaire être ouverte à la circulation des voitures.



**Figure 58 : situation routière «Voie de bus ouverte à la circulation des voitures»**

Sur le côté de la route, un panneau avec des flèches représentant l'allocation des voies est testé avec ou sans l'ajout d'un panneau rond bus bleu. Ces signalisations sont selon les photos complétées ou pas par des marquages au sol, des plots lumineux rouges et verts. La signalisation est testée en amont, et pendant les changements, pour l'ouverture et la fermeture des voies de bus aux voitures.

Le Tableau 26 résume ces résultats.

Situation	O/F	Type	NbRep_S1	S1	%BonRep_S1	%BonRep_0m_S1	%BonRep_50m_S1	%BonRep_S1+S2	%BonRep_0m_S1+S2	%BonRep_50m_S1+S2	S2	Type	NbRep_S1+S2
T2_1	O	Avt	93	adjonction bus	77,4	91,4	77,4	85,1	85,1	87,2	Plots rouges+verts à 50m	Avt	94
T2_1	O	Avt	44	adjonction bus	79,6	90,9	79,6	86,0	82,0	88,0	Plots rouges+verts à 50m	Avt	44
T2_1	O	Avt	49	adjonction bus	75,5	91,8	75,5	84,1	88,6	86,6	Plots rouges+verts à 50m	Avt	49
T2_2	O	Chgt	93	adjonction bus+rond bleu diodes	43,0	46,2	80,7	71,3	74,5	91,5	Plots verts	Chgt	94
T2_2	O	Chgt	44	adjonction bus+rond bleu diodes	54,6	56,8	86,4	82,0	82,0	96,0	Plots verts	Chgt	44
T2_2	O	Chgt	49	adjonction bus+rond bleu diodes	32,7	36,7	75,5	59,1	65,9	86,4	Plots verts	Chgt	49
T2_3	O	Pdt	93	voies simples + rond bleu diodes	60,2	65,6	66,7	77,7	78,7	84,0	Plots verts	Pdt	94
T2_3	O	Pdt	44	voies simples + rond bleu diodes	68,2	79,6	70,5	76,0	76,0	82,0	Plots verts	Pdt	50
T2_3	O	Pdt	49	voies simples + rond bleu diodes	53,1	53,1	63,3	79,6	81,8	86,4	Plots verts	Pdt	44
T2_4	F	Avt	94	rabattement bus	27,7	27,7	98,9	61,3	63,4	88,2	Plots verts+rouges à 50m	Avt	93
T2_4	F	Avt	50	rabattement bus	22,0	22,0	100,0	75,0	75,0	88,6	Plots verts+rouges à 50m	Avt	49
T2_4	F	Avt	44	rabattement bus	34,1	34,1	97,7	49,0	53,1	87,8	Plots verts+rouges à 50m	Avt	44
T2_5	F	Chgt	94	rabattement bus + rond bleu	34,0	39,4	91,5	72,0	74,2	88,2	Plots rouges	Chgt	93
T2_5	F	Chgt	50	rabattement bus + rond bleu	28,0	32,0	94,0	79,6	81,8	93,2	Plots rouges	Chgt	49
T2_5	F	Chgt	44	rabattement bus + rond bleu	40,9	47,7	88,6	65,3	67,4	83,7	Plots rouges	Chgt	44
T2_6	F	Pdt	94	voies bus + rond bleu	88,3	91,5	89,4	88,2	89,3	93,6	Plots rouges	Pdt	93
T2_6	F	Pdt	50	voies bus + rond bleu	92,0	98,0	94,0	86,4	86,4	88,6	Plots rouges	Pdt	49
T2_6	F	Pdt	44	voies bus + rond bleu	84,1	84,1	84,1	89,8	91,8	98,0	Plots rouges	Pdt	44

**Tableau 26 : résultats « Voie de bus ouverte à la circulation des voitures »**

#### **8.2.4.2.1 Signalisation indiquant l'ouverture aux voitures d'une voie de circulation réservée aux bus**

Deux panneaux sont testés pour signaler l'ouverture de la voie réservée aux bus aux voitures, mais l'un est présenté 50m avant le changement, l'autre au moment du changement, rendant les différences difficiles à interpréter. Le panneau d'ouverture de la voie complété du panneau rond bus bleu barré à son sommet a des taux de bonnes réponses inférieurs au panneau seul. (43% contre 77,4%). Pour autant, même si les commentaires sur les panneaux indiquaient que ce panneau combiné était très mal compris, ce panneau étant présenté au niveau du changement et non pas 50m avant comme le précédent, le faible score peut aussi venir pour partie, comme pour le premier tableau, du fait que les personnes ne savent pas forcément déterminer sur la photo si « à partir de maintenant » signifie avant ou après le panneau. Toutefois, lorsque l'on regarde les taux de bonnes réponses sur ce panneau présenté une fois la situation établie, les taux de bonnes réponses sont toujours plus faibles que les taux sur le panneau construit sans le rond bleu et présenté 50m avant. Dans ces deux situations, l'influence de la formulation « à partir de maintenant » n'intervient pas car il n'y a pas de changement immédiat. On peut estimer que l'écart que l'on rencontre entre les deux panneaux (77,4% de bonnes réponses pour le panneau de voies seul, 60% pour le panneau combiné, avec de fortes disparités sur les deux sous échantillons qui ont vu cette photo (68% et 53%)) provient d'une moindre compréhension du panneau combinant le rond bleu et le dessin des voies par rapport au panneau des voies seul. On retrouve donc en situation, les résultats issus de l'analyse des panneaux hors contexte. Pour mémoire, les sujets ont répondu qu'ils trouvaient la signalétique trop complexe et ne comprenaient pas si le panneau s'adressait aux voitures ou seulement aux bus. Ils jugeaient aussi contradictoire de frapper un panneau bleu d'obligation par des diodes rouges marquant une interdiction.

#### **8.2.4.2.2 Signalisation indiquant la fin de l'ouverture temporaire aux voitures d'une voie de circulation réservée aux bus**

Dans cette situation, la voie de bus ouverte temporairement, redevient un couloir réservé aux bus. Les panneaux indiquent un rabattement de voie avec un bus incrusté sur la voie. Ce panneau est surmonté dans certaines photos par un panneau rond bleu représentant un bus. Ce ne sont pas les deux mêmes paysages citadins qui servent de fond aux deux photos, les



comparaisons ne se faisant donc pas toute chose égale par ailleurs, d'autant que sur l'une (panneau rabattement seul, le marquage BUS au sol et visible et pas dans l'autre). Les résultats de ces deux panneaux montrent toutefois une mauvaise compréhension par les sujets (27% de bonnes réponses pour le panneau rabattement avec bus incrusté, 34% pour le même panneau couplé avec le rond bus bleu, avec de fortes disparités sous les deux sous-échantillons de chaque situation testée.

#### **8.2.4.2.3 Impact de la signalisation au sol**

Dans tous les cas présentés dans cet environnement, la signalisation au sol, que les plots soient verts ou rouges augmente de façon considérable le taux de bonnes réponses par rapport aux mêmes situations présentées uniquement avec une signalisation verticale. Par exemple, lors de l'ouverture de la voie de bus aux voitures, les plots verts ajoutés à la signalisation du panneau d'adjonction de voie avec bus incrusté et rond bleu barré permettent de faire passer le taux de bonnes réponses de 77,2 à 85,1%.

De la même façon, l'ajout de plots rouges au panneau de rabattement de voie avec bus incrusté et rond bleu au-dessus, permet de faire passer le taux de bonnes réponses de 34 à 72%.

#### **8.2.4.3 Voie normale de circulation sur autoroute réservée au bus**

Dans cet environnement, les sujets se retrouvent au volant de leur voiture sur une autoroute urbaine à 3 voies.



**Figure 59 : situation routière « Voie normale de circulation sur autoroute réservée au bus »**

Les panneaux de signalisation sont situés au-dessus des voies (S1) et sur le bas-côté de la voie (S2). La voie la plus à droite est susceptible de se voir exclusivement affectée à la circulation des bus. Plusieurs signalisations sont testées au-dessus des voies : les trois premiers panneaux: rond bus noir, B0 sauf bus et la flèche jaune oblique. Sur le bas-côté, les panneaux que l'on peut rencontrer sont des panneaux qui dérivent une ouverture ou fermeture de voie avec un bus incrusté.

Le Tableau 27 récapitule les taux de bonnes réponses pour chaque situation, soit avec uniquement une signalisation au-dessus des voies uniquement soit avec cette signalisation couplée avec une signalisation verticale sur le bas-côté.

Situation	O/F	Type	NbRep_ S1	S1	%BonRep S1	%BonRep 0m_ S1	%BonRep 50m_ S1	%BonRep S1+S2	%BonRep 0m_ S1+S2	%BonRep 50m_ S1+S2	S2	O/F	Type	NbRep S1+S2
T3_1	F	Avt	93	Fleche jaune	56,99	65,59	78,49	39,36	41,49	90,43	rabattement +bus	F	Avt	94
T3_1	F	Avt	44	Fleche jaune	45,45	61,36	68,18	42	46	88	rabattement +bus	F	Avt	50
T3_1	F	Avt	49	Fleche jaune	67,35	69,39	87,76	36,36	36,36	93,18	rabattement +bus	F	Avt	44
T3_2	F	Pdt	44	rond bus	40,91	56,82	40,91	52,13	58,51	80,85	rabattement +bus	F	Chgt	49
T3_2b	F	Pdt	50	B0	93,8	93,88	95,92	78	84	50	rabattement +bus	F	Chgt	94
T3_3	F	Pdt	49	rond bus	69,39	75,51	69,39	76	86	76	voie bus	F	Pdt	44
T3_3b	F	Pdt	44	B0	54,55	86,36	54,55	79,55	93,18	79,55	voie bus	F	Pdt	50
T3_4	F	Avt	94	rond bus	54,26	67,02	54,26	48,39	77,42	59,14	adjonction bus	O	Avt	94
T3_4	F	Avt	50	rond bus	64	72	64	45,45	75	63,64	adjonction bus	O	Avt	50
T3_4	F	Avt	44	rond bus	43,18	61,36	43,18	51,02	79,59	55,1	adjonction bus	O	Avt	44
T3_4b	F	Avt	94	B0	77,66	89,36	80,85	41,94	93,55	47,31	adjonction bus	O	Avt	93
T3_4b	F	Avt	50	B0	90	98	90	25	93,18	31,82	adjonction bus	O	Avt	49
T3_4b	F	Avt	44	B0	63,64	79,65	70,45	57,14	93,88	61,22	adjonction bus	O	Avt	44
T3_5	O	Pdt	0	flèche verte	*	*	*	64,52	74,19	83,87	adjonction bus	O	Chgt	93
								63,64	81,82	79,55	adjonction bus		Chgt	49
								65,31	67,35	87,76	adjonction bus		Chgt	44
T3_6	O	Pdt	44	flèche verte	77,27	93,18	79,55	*	*	*	voies simples	O	Pdt	0

**Tableau 27 : résultats « Voie normale de circulation sur autoroute réservée au bus »**

#### **8.2.4.3.1 Signalisation indiquant la fermeture aux voitures d'une voie de circulation pour la réserver à la circulation des bus**

Dans ces situations, la voie la plus à droite se ferme à la circulation des voitures pour devenir une voie de circulation réservée aux bus. Nous avons dans notre plan expérimental séparé les situations avant, pendant et après le changement de voie. Si cette distinction a du sens en double signalisation, elle conduit aux mêmes photos en utilisant les seules signalisations au-dessus des voies. Les panneaux ronds bus noir et B0 présentés seuls au-dessus des voies ont donc été présentés aux quatre sous échantillons. Si on fait la moyenne des taux de bonnes réponses pour ces deux panneaux, on trouve un taux de bonnes réponses de 75,5 % pour le panneau B0 (panneau blanc cerclé de rouge) et seulement 54,4% pour le panneau rond bus noir. Ces chiffres confirment en situation les résultats établis dans l'analyse de la compréhension des panneaux hors contexte. Il était ressorti que pour beaucoup de sujets, la couleur noire était ambiguë, les sujets ne sachant pas s'il fallait la considérer comme une obligation ou une interdiction.

#### **8.2.4.3.2 Signalisation indiquant la fin de la réservation temporaire aux bus d'une voie de circulation normale**

La simple signalisation au-dessus des voies n'autorise qu'une signalisation dans ce cas : la flèche verte, bien connue des automobilistes. Si le taux de bonnes réponses pour déterminer si la voie est accessible 'à partir de maintenant' est très fort (93%), on note que pour les sujets, cette signalétique n'est pas forcément valable 50m plus loin car pour cette deuxième question, le taux de bonnes réponses est plus faible, 79,5%, les automobilistes ayant l'habitude de voir les panneaux verts au-dessus des voies se répéter à des intervalles très courts.

#### **8.2.4.3.3 Impact de la double signalisation au bord de la route**

On ne peut que difficilement comparer les deux situations (panneau au-dessus des voies seul, panneau au-dessus des voies couplé par un panneau sur le bord de la route) car le fait de coupler les deux signalisations ne renvoie pas à la même signalisation. Par exemple, le panneau seul au-dessus des voies B0 renvoie à une situation où la voie de droite est fermée aux voitures maintenant et dans 50 m alors que si on couple cette signalisation avec un panneau indiquant une voie qui se rabat ou une voie qui s'ouvre, on change les droits de circulation dans la situation présente ou celle dans 50m.

On peut toutefois établir des comparaisons quand la deuxième signalisation est constante et que la première change. Par exemple, dans les cas de double signalisation avec un panneau indiquant que le bus doit se rabattre, on peut comparer les résultats avec au-dessus des voies des pictogrammes avec une flèche jaune oblique, B0 sauf bus et le rond bus noir (situations T3\_1, T3\_2, T3\_2b). Le taux de bonnes réponses avec la flèche jaune au-dessus de la voie est

assez faible (39,4%) comparé au taux de bonnes réponses avec le rond noir bus (52,1%) et le B0 (78%).

On peut aussi comparer les situations lorsque la situation est établie, en dehors de tout changement imminent ou à venir. On peut donc analyser les situations t3\_3 et t3\_3b où l'on compare les panneaux B0 et rond bus noirs seuls avec ces mêmes signaux couplés avec un panneau en bord de route marquant la voie la plus à droite réservée aux bus.

Dans les deux cas, rond bus noir et B0, le panneau en bord de route améliore la signalisation puisque les taux de bonnes réponses passent respectivement de 69,4 à 76% pour le rond bus noir et de 54,55 à 79,5% pour le B0.

#### 8.2.4.4 Bande d'arrêt d'urgence ouverte à la circulation des bus

Dans cet environnement, les sujets sont au volant de leur voiture, sur une autoroute à deux voies avec bande d'arrêt d'urgence. La bande d'arrêt d'urgence (BAU) peut être affectée temporairement à la circulation des bus. Aucune voiture ne peut rouler sur la BAU.



**Figure 60 : situation routière « Bande d'arrêt d'urgence ouverte à la circulation des bus »**

Les questions posées portaient donc uniquement sur les droits de circulation des bus sur la BAU au point de vue de la photo et 150m plus loin.

Situation	O/F	Type	NbRep_S1	S1	%BonRep S1	%BonRep 0m_S1	%BonRep 50m_S1	%BonRep S1+S2	%BonRep 0m_S1+S2	%BonRep 50m_S1+S2	S2	Type	NbRep S1+S2
T4_1	F	Avt	94	croix	90,43	95,74	90,43	41,94	95,7	41,94	adjonction bus	93	Avt
T4_1	F	Avt	50	croix	92	98	92	59,09	100	59,09	adjonction bus	49	Avt
T4_1	F	Avt	44	croix	88,64	93,18	88,64	26,53	91,84	26,53	adjonction bus	44	Avt
T4_2	O	Pdt	93	rond bus	66,7	73,12	69,89	61,36	65,91	88,64	adjonction bus	49	Chgt
T4_2	O	Pdt	49	rond bus	73,47	75,51	79,59				adjonction bus		Chgt
T4_2	O	Pdt	44	rond bus	59,09	70,45	59,09				adjonction bus		Chgt
T4_2b	O	Pdt	49	B0	73,74	80,81	76,77	61,22	63,27	79,59	adjonction bus	44	Chgt
T4_3	O	Pdt	93	rond bus	79,79	92,55	80,85	81,63	81,63	89,8	voies bus	44	Pdt
T4_3	O	Pdt	49	rond bus	80	92	82				voies bus		Pdt
T4_3	O	Pdt	44	rond bus	79,55	93,18	79,55				voies bus		Pdt
T4_3b	O	Pdt	44	B0	61,36	73,86	61,36	75	86,36	75	voies bus	49	Pdt
T4_4	F	Chgt	93	Fleche jaune oblique	52,69	60,22	69,89	64,99	67,02	95,74	rabattement bus	44	Chgt
T4_4	F	Chgt	49	Fleche jaune oblique	52,27	52,27	70,45				rabattement bus		Chgt
T4_4	F	Chgt	44	Fleche jaune oblique	53,06	63,27	69,39				rabattement bus		Chgt
T4_5	F	Pdt	94	croix	*	*	*	75,53	78,72	94,68	rabattement bus	94	Pdt
								80	80	100	rabattement bus	50	Pdt
								70,45	77,27	88,64	rabattement bus	44	Pdt
T4_6	F	Pdt	94	croix	*	*	*	92,55	96,81	93,62	voie croix	94	Pdt
								94	98	96	voie croix	50	Pdt
								90,91	95,45	90,91	voie croix	44	Pdt

**Tableau 28 : résultats « Bande d'arrêt d'urgence sur autoroute réservée aux bus »**

##### 8.2.4.4.1 Signalisation indiquant l'ouverture aux bus de la BAU

Deux signalisations au-dessus de la BAU ont été testées dans cette configuration: le rond bus noir, le B0 sauf bus et la croix simple. Une seule signalisation au-dessus de la BAU ne permettant pas de discriminer les situations pendant ou avant le changement, les mêmes



photos ont été présentées à plusieurs sous questionnaires. La variabilité des bonnes réponses pour un même panneau est extrêmement grande. Le panneau B0 peut avoir pour un groupe, un taux de bonnes réponses de 63,4% et 90% dans un autre. Dans le premier cas, le panneau apparaît en premier dans la série des 6 photos du même environnement, dans le deuxième groupe, le panneau B0 apparaît en quatrième position.

En faisant la moyenne sur tous les sous-groupes confondus, on note que le pourcentage de bonnes réponses pour le panneau B0 est moindre que celui du rond bus noir (67,5% contre 73%), les variations entre les sous-groupes rendant les écarts difficilement interprétables.

#### **8.2.4.4.2 Signalisation indiquant la fin de l'ouverture temporaire aux bus de la BAU**

Deux signalisations ont été testées : la croix et la flèche jaune oblique au-dessus de la BAU. La croix bénéficie d'un meilleur taux de bonnes réponses, n'apportant pas de doute sur le moment ou l'interdiction s'applique, contrairement à la flèche jaune oblique. (90% de bonnes réponses pour la croix contre 69,8% pour la flèche jaune oblique).

#### **8.2.4.4.3 Impact de la double signalisation avec panneau en bordure de route**

Comme dans les situations du tableau précédent, les comparaisons entre signalisation unique au-dessus des voies et couplées à un panneau verticales sur le bord de la route sont difficiles à faire car la double signalisation change les règles de circulation par rapport au panneau seul au-dessus de la voie.

On peut toutefois établir des comparaisons quand la deuxième signalisation est constante et que la première change. Lorsque le panneau sur le bord de la voie indique qu'une voie s'ouvre sur la BAU pour les bus, sur les photos de situations, il peut être couplé au-dessus de la BAU par trois panneaux : le rond bus noir, le B0 sauf bus et la croix. Les taux de bonnes réponses est obtenu avec le B0 (61,2%) ou avec le rond bus noir sont similaires (61,2% et 61,3%) par contre, ceux obtenus avec la croix sont beaucoup plus faibles (41,9%), la confusion se faisant sur les droits de circulation 150m après le panneau, la croix venant interférer et contredire le message au bas-côté de la route.

### **8.2.5 Discussion et recommandations**

Même si la complexité et le nombre trop important de situations présentées non pas pu permettre la mise en place de tests statistiques et de comparaisons 'toutes choses égales par ailleurs', la variabilité des situations visitées par les sujets amènent à des remarques et réflexion convergentes. Pour une prochaine étude, les différentes versions du questionnaire gagneront à ne pas mélanger les environnements différents et à limiter le nombre de situations présentées. L'ordre de présentation des photographies ayant un impact non négligeable sur les résultats, une autre solution devra être envisagée pour rendre plus variable et aléatoire cet ordre de présentation. En diminuant le nombre de cas présentés, on s'affranchit partiellement de cet écueil.

Il ressort de l'analyse des résultats que la couleur noire des panneaux à message variables est très mal comprise quand elle est utilisée pour le fond d'un panneau rond comportant un bus, certains sujets l'interprétant comme une obligation, d'autres à l'inverse comme une obligation. Autre point saillant de ces résultats : les signalisations construites en juxtaposant plusieurs panneaux ne sont pas du tout bien perçues. Les informations sont trop complexes et nombreuses, le panneau ne permet pas une compréhension facile de la situation en quelques secondes.

La signalisation au sol améliore grandement la compréhension de la situation et des règles de conduite surtout lorsque les plots sont rouges et marquent une interdiction. Les plots verts n'améliorent pas toujours la compréhension de la situation par rapport au panneau seul, surtout quand on se trouve dans la situation où la voie de bus la plus à droite dans une circulation normale peut-être affectée aux bus mais ne l'est pas encore et va le devenir dans 50m. Il y a interférence entre le panneau qui signale un rabattement de voie et le marquage au sol qui indique que l'on peut circuler sur la voie à droite. Peut-être est-ce dû à la faible lisibilité de l'information indiquant la distance à laquelle a lieu le changement.

Lorsqu'un panneau fait état d'un changement d'affectation de la voie, il est impératif de choisir un panneau qui indique une continuité dans la voie la plus à droite, avec un bus incrusté sur la portion de voie réservée en amont ou en aval du changement. Le panneau sans l'incrustation du bus et la continuité de la voie est perçu bien souvent comme un rétrécissement de voie applicable à tous les véhicules. La situation devient vite incompréhensible.

Dernier point maquant de ces résultats, l'incompréhension est grande face au panneau bleu des bus barré par des diodes rouges pour marquer une fin d'obligations. Les commentaires font apparaître un trouble majeur devant ce que certains sujets considèrent comme une contradiction : le bleu de l'obligation et le rouge de l'interdiction. Le message, trop complexe, est mal compris.

#### **8.2.6 Conclusion :**

Cette étude a mis en lumière la difficulté toute particulière de mettre en place une signalisation adéquate pour informer les automobilistes des situations d'allocations dynamiques de voies réservées à la circulation des bus. Lorsque la situation est établie et que la signalisation n'est là que pour rappeler les règles en vigueur, les différentes signalisations testées sont relativement bien perçues, les plus claires reposant sur des panneaux symbolisant les voies avec une incrustation du bus sur la voie réservée ou son absence quand la voie ne lui est plus réservée. Lorsque la situation change, la signalisation à mettre en place mérite réflexion. L'automobiliste doit savoir en un coup d'œil à qui s'adresse la signalisation et comment il doit modifier ou pas sa propre trajectoire. La juxtaposition de panneaux rend la signalisation trop complexe à appréhender. Par contre une signalisation au sol avec plot lumineux améliore grandement la compréhension des diverses situations.

### **8.3 Utilisabilité du système Advice et de ses changements de modes**

Cette première enquête a permis de voir quelles signalisations sont plus ou moins bien comprises par des usagers de la route autres que les utilisateurs du système Advice. Cette deuxième partie vise à identifier les autres aspects qu'il faudra tester avant de mettre en place une démonstration en site réel du système.

Pour cela, il faudra réalisées une expérimentation sur simulateur de conduite qui testera les situations suivantes :

- Ouverture des voies à la circulation pour tous
- Conduite avec voie ouverte
- Fermeture de la voie pour tous
- Conduite avec voie fermée

Avec des conditions de trafic différentes :

- Trafic fluide
- Trafic dense

Avec des comportements des autres usagers différents :

- Comportement normal
- Comportement infractionniste

Avec des usagers différents

- Conducteurs réguliers/non réguliers en ville avec bus
- Différentes classes d'âge

Cette expérimentation permettra d'observer les différents comportements dans les mêmes situations. En effet, le simulateur permet de créer des scénarios identiques pour tous les conducteurs en contrôlant les instants d'arrivée des événements et les vitesses des véhicules du trafic en fonction de la vitesse et position du véhicule du participant.

Cette expérimentation comportera des entretiens avec les participant en auto confrontation (c'est-à-dire la diffusion vidéo des situations qu'ils ont rencontrées pendant l'expérimentation) pour verbaliser leur ressenti et expliquer leur compréhension des situations et leurs décisions.

Les différentes étapes de cette expérimentation seront les suivantes

- Identification des situations à tester
- Création des scénarios de simulation
- Création des bases de données des nouveaux objets de signalisation
- Définition du protocole expérimental
- Passation de l'expérimentation
- Analyse des résultats
- Spécification du système final

## 9 CONCLUSION RAPPORT

La mise en place d'un système pour l'optimisation des temps de trajet aux heures de pointe pour différentes catégories d'utilisateurs est possible.

Mais d'un point de vue humain elle nécessite de :

- Mettre en place d'une signalisation forte, fiable et réactive
- Sensibiliser les utilisateurs, car les risques d'accidents sont importants notamment à cause de la rupture des habitudes.

D'un point de vue technologique :

Celles à mettre en œuvre existent déjà mais elles nécessitent de faire des choix d'architecture système en fonction de si l'on veut un système automatique ou à déclenchement manuel.

Des critères sont aussi à prendre en compte en terme de :

- Fiabilité du système,
- Coût,
- Qualité,
- Disponibilité,
- D'alimentation en énergie,
- Réglementation
- Exploitation
- Maintenance

Le cœur du système doit être capable de gérer de façon différenciée :

- La collecte des informations (données des différents capteurs)
- La gestion des priorités (différentiations dans les informations en fonction des destinataires)
- La diffusion de l'information (signalisation Verticale et horizontale, information embarquée).

L'intégration de ces différentes technologies amène une réflexion sur l'usage d'une standardisation spécifique pour des réseaux de capteurs et d'équipement informatique permettant de gérer les informations sous forme de message (Middleware & broker de message).

L'expérimentation et le prototypage permettra de vérifier l'ensemble de ces hypothèses.

## 10 BIBLIOGRAPHIE

- [ARA12] B.N. Araghi, L.T. Christensen, R. Krishnan, and H. Lahrmann. *Application of Bluetooth Technology for Mode-Specific Travel Time Estimation on Arterial Roads: Potentials and Challenges*. Proceedings from the Annual Transport Conference at Aalborg University, 2012.
- [ARR07] ARRB Consulting, Le Trobe University. *Battery Life Analysis of the Sensys Wireless Vehicle Detection System*. Sensys White Paper. 2007
- [BEL08] P. Bellavista, A. Kupper, and S. Helal. *Location-Based Services: Back to the Future*. IEEE Pervasive Computing Magazine, vol.7 (No.2), Avril-Juin 2008.
- [CAR99] M.J. Caruso, and L.S. Withanawasam, Honeywell Inc. Solid State Electronics Center. *Vehicle Detection and Compass Applications using AMR Magnetic Sensors*. Sensors Expo, Baltimore, 1999.
- [CER99] CERTU. *PREDIT : DATA PLUS, Etude prospective dans le domaine du recueil de données de trafic*. Septembre 1999.
- [CER07] CERTU, LCPC, J. Bertrand, S.S. Ieng, M. Pithon, et J. Rivault. *Mesure du temps de parcours par analyse de la signature électromagnétique des véhicules*. Octobre 2007.
- [CER08] CERTU. *Les temps de parcours. Estimation, diffusion et approche multimodale*. Avril 2008.
- [CHE07] S.Y. Cheung, and P. Varaiya. *Traffic Surveillance by Wireless Sensor Networks: Final Report*. California PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) Program, Janvier 2007.
- [COI07] B. Coifman, and S. Krishnamurthy. *Vehicle reidentification and travel time measurement across freeway junctions using the existing detector infrastructure*. Transportation Research Part C, pp. 135-153, 2007.
- [ERN10] J.M. Ernst, J.V. Krogmeier, and D.M. Bullock. *Non-linear compensation of vehicle signatures captured from electromagnetic sensors with application to vehicle re-identification*. 13<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Septembre 2010.
- [EUR10] Directive 2010/40/UE du Parlement Européen et du Conseil. *Concernant le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents dans le domaine du transport routier et d'interfaces avec d'autres modes de transport*. 7 juillet 2010.
- [HER09] J.-C. Herrera, D. Work, X. Ban, R. Herring, Q. Jacobson and A. Bayen. *Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: the Mobile Century field experiment*. Transportation Research C, 18, pp. 568–583, 2010.

- [JAG07] T. Jager. *Etat de l'art sur les microcapteurs de mouvement*. Rapport interne CEA, 2007.
- [KAT08] Y.A. Kathawala, and B. Tueck. *The use of RFID for traffic management*. International Journal of Technology, Policy and Management, vol.8 (No.2), pp. 111-125, 2008.
- [KHO11] A. Khosravi, E. Mazloumi, S. Nahavandi, D. Creighton, and J.W.C. van Lint. *Prediction intervals to account for uncertainties in travel time prediction*. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, vol.12 (No.2), pp. 357-547. Juin 2011.
- [KHO11-2] V. Khorani, F. Razavi, and V.R. Disfani. *A mathematical model for urban traffic and traffic optimization using a developed ICA technique*. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, vol.12, pp. 1024-1036. Décembre 2011.
- [KLE06] L.A. Klein, M.K. Mills, and D.R.P. Gibson, Federal Highway Administration (FHWA). *Traffic Detector Handbook: Third Edition*. Octobre 2006.
- [KWO09] K. Kwong, R. Kavalier, R. Rajagopal, and P. Varaiya. *A Practical Scheme for Arterial Travel Time Estimation based on Vehicle Re-identification Using Wireless Sensors*. Transportation Research Board, 89<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington D.C., Janvier 2009.
- [LAO96] R. Lao, and D. Czajkowski. *Magnetoresistors for Automobile Detection and Traffic Control*. IEEE Sensors, Avril 1996.
- [LED08] G. Leduc. *Road Traffic Data: Collection Methods and Applications*. Technical Note, Joint Research Centre, European Commission. Novembre 2008.
- [LEG11] A. Le Goff. *Contrôle et diagnostic par un réseau de capteurs magnétiques en automobile*. Thèse de doctorat, 2011.
- [MAG] Société Magsys : <http://www.magsys.net/>
- [MAR78] S.V. Marshall. *Vehicle Detection Using a Magnetic Field Sensor*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-27 (No.2), Mai 1978.
- [MER10] J. Merkisz, and R. Grzeszczyk. *Virtual Reality and Hardware In-the-Loop Testing Methods in the eCall In-Vehicle Module Research and Verification*. Advanced Microsystems for Automotive Applications 2010, Meyer – Valldorf, Springer, 2010.
- [MOH11] M. Mohammadi, E. Molaei, and A. Naserasadi. *A Survey on Location based Services and Positioning Techniques*. Foundation of Computer Science, 2011.
- [MSA09] A. Msaed. *Micro capteur magnétique de mesure de courant et traitement intégré*. Thèse de doctorat, 2009.
- [NDO09] M. Ndoeye, V. Totten, J.V. Krogmeier, and D.M. Bullock. *A Signal Processing Framework for Vehicle Re-identification and Travel Time*

*Estimation*. 12<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Octobre 2009.

- [NUM] Description du capteur Groundhog en 2005 : <http://www.ae-traffic.com/NuMetricsGroundhog.html> - La société Nu-metrics a depuis été reprise par Vaisala.
- [REM11] S.M. Remias, A.M Hainen, S.R. Mitkey, and D.M. Bullock. ***Probe Vehicle Re-identification Data Accuracy Evaluation***. 18th World Congress on ITS, Orlando, Florida, Octobre 2011.
- [RES11] R.A. Rescot. *Feasibility of Bluetooth Data as a Surrogate Analysis Measure of Traffic*. Thèse de doctorat, 2011.
- [RIP99] P.Ripka. *Magnetic Sensors for Traffic Control*. ISMCR Tokyo, vol. 10, pp. 241-246, 1999.
- [RIT10] Research and Innovative Technology Administration (RITA), U.S. Department of Transportation (US DOT). *ITS Unit Costs Database (as of 30 October 2010)*. Intelligent Transportation Systems, Joint Program Office, [www.itscosts.its.dot.gov](http://www.itscosts.its.dot.gov)
- [SAN11] R.O. Sanchez, C. Flores, R. Horowitz, R. Rajagopal, and P. Varaiya. *Vehicle Re-identification Using Wireless Magnetic Sensors: Algorithm Modifications and Performance Analysis*. IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), pp. 226-231, Juillet 2011.
- [SEN08] Sensys Networks. *The Sensys Wireless Vehicle Detection System, Advanced Technology for 21<sup>st</sup> Century Traffic Management, System Overview*. 2008.
- [SEN08-2] A. Haoui, R. Kavalier, and P. Varaiya, co-fondateurs de Sensys. *Wireless magnetic sensors for traffic surveillance*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 16, issue 3, pp. 294-306, Juin 2008.
- [SEN12] Sensys Networks. *VSN2040 Wireless Magnetometer Sensor Installation Guide*. P/N 152-240-100-001, Rev H, Octobre 2012.
- [STE] Société Steral : <http://www.sterela.fr/systemes-electroniques.asp>
- [VAI] Société Vaisala : <http://www.vaisala.com/en/roads/Pages/default.aspx>
- [VDC07] The Vehicle Detector Clearinghouse. *A summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems*. Southwest Technology Development Institute, Federal Highway Administration's Intelligent Transportation Systems Program Office, Août 2007.
- [YUM11] M. Yu, D. Zhang, Y. Cheng, and M.S. Wang. *An RFID electronic tag based automatic vehicle identification system for traffic iot applications*. Control and Decision Conference, 2011.

- [AN 1089]** Agilent Technologies 1999, Application Note N°1089 "Designing Detectors for RF/ID Tags".
- [LON]** ANSI/EIA 709.1-A-1999 Control Network Protocol Specification
- [Echelon Mac]** "Enhanced Media Access Control with LonTalk Protocol", 01/1995, available at <http://www.echelon.com>
- [protocole Echelon] "LonTalk Protocol", 04/1993, available at <http://www.echelon.com>
- [openrouter] IST-2000-28503 OPENROUTER, Deliverable 10, Report on Integration and Testing, CSEM editor, november 2002.
- [Gu 01] C. Guo, C. Zhong and J. M. Rabaey, Low power distributed MAC for ad hoc sensor radio networks, IEEE GlobeCom 2001, Nov. 2001
- [Gu 04] Gu, Lin and Stankovic, John, Radio-triggered Wake-Up capability for sensor networks, Proceedings of the 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'04) [http://www.cs.virginia.edu/papers/Radio\\_Triggered.pdf](http://www.cs.virginia.edu/papers/Radio_Triggered.pdf)
- [Rabaey 04] Rabaey, Jan, En-Yi, A., Wolisz, Adam, Power-Efficient Rendez-vous Schemes for Dense Wireless Sensor Networks, IEEE Communication Society, [http://bwrc.eecs.berkeley.edu/People/Faculty/jan/publications/EnyiLin\\_ICC04.pdf](http://bwrc.eecs.berkeley.edu/People/Faculty/jan/publications/EnyiLin_ICC04.pdf)
- [Gerrits 06] Gerrits, Johann, A Wideband FM Demodulator Circuit for a Low-Complexity FM-UWB Receiver, CSEM, ECWT2006 conference, Manchester 2006 (best paper award)
- [Jeanne-Beylot 03] ABC de la RFID, Décembre 2003, Bernard Jeanne-Beylot
- [Gauthier 02] Gauthier, François, L'étiquette RFID est devenue "mature"... Mesures n° 745, mai 2002, [http://www.mesures.com/archives/053\\_057\\_TEN.pdf](http://www.mesures.com/archives/053_057_TEN.pdf)
- [MARLOW 06] IMEC, <http://www.lowpower.org/Workshops/MARLOW-newsletter-5.pdf>
- [Piguet 06] Christian Piguet, Editor, "Low-Power Processors and Systems on Chips", CRC Press Taylor & Francis, 2006, ISBN 0-8493-6700-X
- [GS1 05] GS1 France, Gencod, EPC Global France, Liste des Offreurs de Solutions RFID29 septembre 2005, [http://www.eannet-france.org/download/nonprotege/b\\_outils\\_ean/rfid/EPC2005-003](http://www.eannet-france.org/download/nonprotege/b_outils_ean/rfid/EPC2005-003)
- [Ryckaert 05] Ryckaert, Julien et al., Ultra-Wide-Band Transmitter for Low-Power Wireless Body Area Networks : Design and Evaluation, IEEE Transactions on circuits and systems, Vol. 52, N° 12, December 2005.
- [El-Hoiydi 02] Amre El-Hoiydi. Aloha with Preamble Sampling for Sporadic Traffic in Ad Hoc Wireless Sensor Networks. In Proc. IEEE Int. Conf. on Communications, pages 3418-3423, New York, USA, April 2002.
- [El-Hoiydi 04] Amre El-Hoiydi and J.-D. Decotignie. WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for Multi-hop Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the First International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks (ALGOSENSORS 2004), Lecture Notes in Computer Science, LNCS 3121, pages 18-31. Springer-Verlag, July 2004.
- [Peiris 06] Vincent Peiris, Amre El Hoiydi, Antoine Ribordy, Erwan Le Roux, Thierry Melly, David Ruffieux, Franz Pengg, Frédéric Giroud, Nicolas Raemy, Martin Kucera, Lauri Sumanen, Patrick Volet, S. Cserveny, Claude Arm, Pierre-David Pfister, and Ricardo Caseiro. Wisenet, an ultra low-power rf transceiver soc and communication protocol solution for wireless sensor networks. In 15th Workshop on Advances in Analogue Circuit Design, 2006.
- [Enz 04] C. Enz, A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, and V. Pereis. Wisenet: An ultralow-power wireless sensor network solution. IEEE Computer, 37(8):62-70, August 2004.
- [Broch 98] Josh Broch, David A. Maltz, David B. Johnson, Yih-Chun Hu, and Jorjeta Jetcheva, "A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols", In Proc. of the 4th ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98), pages 85-97, 1998.



- [Fall 98] Kevin Fall and Kannan Varadhan, "ns notes and documentation", The VINT project, UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, May 1998.
- [Johansson 99] Per Johansson, Tony Larsson, Nicklas Hedman, Bartosz Mielczarek and Mikael Degermark, "Scenario-based Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile Ad-hoc Networks", Proceedings of IEEE/ACM MOBICOM'99, pages 195-206.
- [Cano 00] Juan-Carlos Cano and Pietro Manzoni, "A Performance Comparison of Energy Consumption for Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols", Proc. of the 8th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2000, pp. 57-64
- [Rabaey 00] Rabaey, Ammer, da Silva, Patel, Roundy, PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking, IEEE Computer, juillet 2000.
- [Silva 01] J. Silva., J. Shamberger, M. J. Ammer, C. Guo, S. Li, R. Shah, T. Tuan, M. Sheets, J. M. Rabaey, B. Nikolic, A. Sangiovanni-Vincentelli, and P. Wright. Design methodology for picoradio networks. Proceedings of the Design Automation and Test in Europe, March 2001.
- [Gu 04] Lin Gu, John A. Stankovic, "Radio-Triggered Wake-Up Capability for Sensor Networks," *rtas*, p. 27, 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'04), 2004.
- [Otis 02] Brian P. Otis, Jan M. Rabaey, A 300 $\mu$ W 1.9GHz CMOS Oscillator Utilizing Micromachined Resonators, ESSCIRC2002 Conference, IMEC, 2002 <http://www.imec.be/esscirc/ESSCIRC2002/presentations/Slides/C06.04.pdf>
- [Otis 05] B. Otis, Y.H. Chee, J. Rabaey, A 400 $\mu$ W-RX, 1.6mW-TX Super-Regenerative Transceiver for Wireless Sensor Networks, 2005 IEEE International Solid-State Circuits Conference, [http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Publications/2005/PRESENTATIONS/botis.isscc/botis\\_isscc\\_2005.pdf](http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Publications/2005/PRESENTATIONS/botis.isscc/botis_isscc_2005.pdf)
- [Willig 02] Andreas Willig, Rahul Shah, Jan Rabaey, Adam Wolisz, Altruists in the PicoRadio Sensor Network, Proc. of 2002 IEEE Workshop on Factory Communication Systems, WFCS'2002, Västerås, Sweden, August 2002
- [El-Hoiydi 05] Amre EL-HOYDI, ENERGY EFFICIENT MEDIUM ACCESS CONTROL FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS, THESE EPFL No 3285
- [Armstrong 05] Trevor Armstrong, Wake-up Based Power Management in Multi-hop Wireless Networks, <http://www.eecg.toronto.edu/~trevor/Wakeup/index.html>
- [Sohrabi 00] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G.J. Pottie. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. IEEE Personal Communications, 7(5):16{27, Oct. 2000.
- [Heinzelmann 00] Wendi Rabiner Heinzelmann, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In Proc. Hawaii International Conference on System Sciences, Jan. 2000.
- [Pei 01] Guangyu Pei and Charles Chien. Low Power TDMA in Large Wireless Sensor Networks. In Proc. IEEE Military Communications Conference MILCOM, volume 1, pages 347-351, Oct. 2001.
- [Li 04] Jing Li and Georgios Y. Lazarou. A Bit-Map-Assisted Energy-Efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks. In Proc. Third International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, April 2004.
- [Ringwald 05] Matthias Ringwald and Kay Raomer. BitMAC: A Deterministic, Collision-Free, and Robust MAC Protocol for Sensor Networks. In Proc. 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2005), pages 57-69, Jan. 2005.
- [van Hoesel 04] L. F. W. van Hoesel, T. Nieberg, H. J. Kip, and P. J. M. Havinga. Advantages of a TDMA based, energy-efficient, self-organizing mac protocol for WSNs. In Proc. IEEE 59th Vehicular Technology Conference, VTC 2004-Spring, volume 3, pages 1598-1602, May 2004.
- [van Hoesel 04-2] L.F.W. van Hoesel and P.J.M. Havinga. A Lightweight Medium Access Protocol (LMAC) for Wireless Sensor Networks: Reducing Preamble Transmissions and Transceiver State Switches. In Proc. INSS, Japan, June 2004.

- [Ye 02]** Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In Proc. IEEE INFOCOM Conf., 2002.
- [van Dam 03]** Tijs van Dam and Koen Langendoen. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In Proc. First ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03), pages 171-180, Nov. 2003.
- [Lu 04]** Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari, and Cauligi Raghavendra. An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Sensor Networks. In Proc. 4th International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (WMAN 04), held in conjunction with the IEEE IPDPS Conference 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, April 2004.
- [Bennett 97]** F. Bennett et al. Piconet: embedded mobile networking. IEEE Journal on Personal Communications, 4(5):8-15, Oct. 1997.
- [LR-WPANS 03]** LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE 802.15.4, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS). IEEE, 2003.
- [Schurgers 02]** Curt Schurgers, Vlasios Tsiatsis, and Mani B. Srivastava. STEM: Topology Management for Energy Efficient Sensor Networks. In Proc. IEEE Aerospace Conf., volume 3, pages 1099-1108, March 2002.
- [El-Hoiydi 02]** Amre El-Hoiydi. Spatial TDMA and CSMA with Preamble Sampling for Low Power AdHoc Wireless Sensor Networks. In Proc. IEEE Int. Conf. on Computers and Communications (ISCC), pages 685-692, Taormina, Italy, July 2002.
- [El-Hoiydi 03]** Amre El-Hoiydi, Jean-Dominique Decotignie, Christian Enz, and Erwan Le Roux. Poster Abstract: WiseMAC, An Ultra Low Power MAC Protocol for the WiseNET Wireless Sensor Network. In Proc. First ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03), pages 302-303, Nov. 2003.
- [Polastre 04]** Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks. In Proc. Second ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04), Nov. 2004.